

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
TELECOMUNICACIÓN



TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

**DESARROLLO DE UNA
HERRAMIENTA DE
APRENDIZAJE EN CONTORNEO
PARA RESIDENTES DE
ONCOLOGÍA RADIOTERÁPICA**

Autor:

Blanca Iñigo Romillo

Enero 2022

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE APRENDIZAJE EN
CONTORNEO PARA RESIDENTES DE ONCOLOGÍA
RADIOTERÁPICA

Autor: Blanca Iñigo Romillo

Tutor: Dra María Elena Hernando Pérez

Cotutor: Dra Carolina de la Pinta Alonso

Departamento: Departamento de Tecnología Fotónica y Bioingeniería

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecerle a mi prima Anita que me hablara del grado en Ingeniería Biomédica y me animara a estudiarlo en una de las mejores universidades de Madrid, como es la UPM. Gracias a ella, descubrí esta carrera y puedo decir que acerté al elegirla.

También quiero dar las gracias a los amigos que he ido haciendo por el camino, a Santi por estar ahí desde el principio y a Natalia por ser un apoyo fundamental para mí el último año.

Por supuesto, no me puedo olvidar de dar las gracias al profesorado de la UPM que me ha hecho posible llegar hasta aquí, por hacerme trabajar tanto y tan duramente. En concreto, quiero agradecer a mis tutoras Elena y Carolina que me hayan acompañado durante todo el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado y, especialmente, que me hayan enseñado tanto de dos mundos tan distintos, animándome siempre a no conformarme, a ser autodidacta y resolutiva. Muchas gracias.

RESUMEN

La radioterapia es una especialidad médica que tiene como objetivo el tratamiento del cáncer mediante el empleo de radiaciones ionizantes. Los avances de este ámbito en los últimos años han hecho posible que el tratamiento sea cada vez más preciso y eficaz.

Parte del proceso de planificación de radioterapia consiste en delimitar las lesiones y los órganos sanos de alrededor definiendo la zona a tratar protegiendo las estructuras adyacentes. Por ello, los sistemas de software para la delimitación del volumen de tratamiento y de los órganos de riesgo son un punto clave en el proceso de la planificación del tratamiento radioterápico ya que en base a esta definición se administrará el tratamiento al paciente.

A pesar de que estos avances son de gran ayuda para los oncólogos radioterápicos y consiguen optimizar el proceso de contorneo de las estructuras anatómicas, siempre será necesario el papel del especialista para asegurar la eficacia del tratamiento y evitar posibles daños derivados de una delimitación imprecisa. Por ello, es imprescindible que los expertos en radioterapia cuenten con una buena formación en delimitación tumoral durante sus años de residencia.

Este Trabajo de Fin de Grado surge con el objetivo de mejorar el entrenamiento de los médicos residentes en segmentación tumoral de forma que la calidad de sus contorneos no dependa únicamente del número de pacientes diagnosticados durante su momento de rotación. Para conseguirlo, se ha desarrollado e implementado una herramienta formativa, denominada *TUSTOOL*, con la que los futuros oncólogos radioterápicos entrenen sus capacidades de identificación y delimitación tumoral en imágenes médicas.

Los médicos residentes pueden auto-registrarse en la aplicación, seleccionar casos filtrándolos por módulo, nivel de dificultad y modalidad de imagen y, finalmente, segmentar sus estructuras en una interfaz basada en la herramienta CERR (Computational Environment for Radiological Research). Una vez realizada la segmentación, la aplicación genera realimentación objetiva mediante la comparación cuantitativa con la delimitación hecha por un experto radiólogo.

Los oncólogos radioterápicos pueden incorporar de forma autónoma nuevos casos en la herramienta y pueden visualizar los resultados obtenidos por los médicos residentes, de forma que *TUSTOOL* constituye también un sistema de seguimiento continuo de los alumnos y un mecanismo de ayuda a la evaluación de su rendimiento en este ámbito.

Palabras clave: TC, RM, PET, Planificación, Radioterapia, Oncología, Segmentación, Entrenamiento, Evaluación, Comparación, Formación, Seguimiento, Kappa, DSC.

SUMMARY

The radiotherapy is a medical specialty that aims to treat cancer through ionizing radiation. Many advances have been achieved within this area, which have made it possible for the treatment to become more precise and efective.

Part of the planification process of radiotherapy consists on delimiting the injuries and the surrounding structures defining the treatment area and protecting the nearby tissues. For this reason, the systems software for the delimitation of the treatment volume and the organs at risk are a key point during the radiotherapical planification process since it is on this process which the treatment administration for the patient is based.

In spite of the support given by these breaktroughts and despite being able to optimize the contouring process of anatomical structures, the role of the specialists in this field will always be essential to ensure the effectiveness of the treatment and to avoid potential side effects derived from an inaccurate delimitation. Therefore, a proper education in tumor delimitation during the residency of every radiation oncologist should be guaranteed.

This Final Degree Project aims to enhace the training of medical residents in tumor segmentation so that the quality of their contours does not only rely on the number of patients that are diagnosed at the time they are working in the radiation oncology department. To achieve this goal, an application called *TUSTOOL* was developed and implemented. This tool is ment to teach future radiation oncologists to identify and delimit tumors on medical images.

Medical residents are able to self-register in the application, select cases filtering them by module, difficulty level and image modality and eventually, segment their structures in an interface based on a tool called CERR (Computational Environment for Radiological Research). Once the segmentation is completed, a cuantitative comparation with a gold standard is carried on by the system which generates objective feedback for the user.

Radiation oncologists are able to autonomously incorporate new medical cases to the system and can display the results obtained by the medical residents. In this way, *TUSTOOL* allows the continous monitoring of students and works as a support mecanism to evaluate their performance in this field.

Key words: CT, MRI, PET, Planification, Radiotherapy, Oncology, Segmentation, Training, Evaluation, Comparation, Education, Monitoring, Kappa, DSC.

GLOSARIO

- **TC:** Tomografía Computerizada (en inglés, CT, *Computed Tomography*)
- **RM:** Resonancia Magnética (en inglés, MRI, *Magnetic Resonance Imaging*)
- **PET:** Tomografía por Emisión de Positrones (en inglés, PET, *Positron Emission Tomography*)
- **RT:** Radioterapia (en inglés, RT, *Radiotherapy*)
- **SBRT:** Radioterapia Estereotáctica Extracraneal (en inglés, SBRT, *Stereotactic Body Radiotherapy*)
- **DICOM:** *Digital Imaging Communications in Medicine*
- **DSC:** Coeficiente de Sørensen-Dice (en inglés, DSC, *Dice Similarity Coefficient*)
- **CERR:** *Computational Environment for Radiological Research*
- **HTTP:** Lenguaje de etiquetas de hipertexto (en inglés, HTTP, *HiperText Transfer Protocol*)
- **cURL:** *Curl URL Request Library*
- **UML:** Lenguaje Unificado Modelado (en inglés, UML, *Unified Modeling Language*)
- **OMS:** Organización Mundial de la Salud
- **TIC:** Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
- **REDCap:** *Research Electronic Data Capture*
- **OAR:** Órganos de riesgo (en inglés, OAR, *Organs At Risk*)
- **API:** *Application Programming Interfaces*
- **JSON:** *JavaScript Object Notation*

Índice

1. Introducción y objetivos	6
1.1. Motivación	6
1.2. Contexto clínico	7
1.3. Estado del arte	7
1.4. Objetivos	9
2. Materiales y métodos	10
2.1. Especificación funcional del sistema	10
2.1.1. Identificación de roles de usuario	10
2.1.2. Especificación de requisitos	10
2.2. Diseño de la aplicación	12
2.2.1. Arquitectura del sistema	12
2.2.2. Modelado UML	13
2.2.3. Diagramas Black Box	18
2.2.4. Diagramas White Box	18
2.2.5. Bocetos y prototipado	20
2.3. Tecnologías empleadas	20
2.3.1. Matlab	20
2.3.2. CERR	20
2.3.3. REDCap	21
2.3.4. Anonimizador de casos.	23
3. Resultados	24
3.1. Modelo de datos	24
3.1.1. Plan formativo de la herramienta	24

3.1.2. Esquema de la base de datos REDCap	26
3.2. Desarrollo	28
3.2.1. Comunicación con REDCap	28
3.2.2. Aplicación MATLAB	30
3.2.3. Validación técnica	53
4. Conclusiones y líneas futuras	54
4.1. Conclusiones	54
4.2. Líneas futuras	54
5. Anexos	59
5.1. ANEXO I: PROTOTIPO DE LA APLICACIÓN	59
5.2. ANEXO II: MANUAL DE USUARIO	62
5.3. ANEXO III: IMPLEMENTACIÓN DEL CÁLCULO DE MÉTRICAS	82
5.4. ANEXO VI: Aspectos socio-económicos, ambientales y éticos	84
5.5. ANEXO V: Presupuesto económico	87

Índice de figuras

1.	<i>Arquitectura del sistema</i>	13
2.	<i>Diagrama de casos de uso</i>	13
3.	<i>Diagrama de secuencia para la gestión de residentes</i>	14
4.	<i>Diagrama de secuencia para la gestión de especialistas</i>	15
5.	<i>Diagrama de secuencia para la visualización de resultados (rol alumno)</i>	16
6.	<i>Diagrama de secuencia para la visualización de resultados (rol especialista)</i>	16
7.	<i>Diagrama de secuencia para la segmentación tumoral</i>	17
8.	<i>Diagrama de secuencia para la creación de nuevos casos</i>	17
9.	<i>Diagrama de caja negra</i>	18
10.	<i>Diagrama de caja blanca (rol alumno)</i>	19
11.	<i>Diagrama de caja blanca (rol especialista)</i>	19
12.	<i>Ejemplo de export desde API playground.</i>	22
13.	<i>Ejemplo de import desde API playground.</i>	23
14.	<i>Modelado de datos conceptual.</i>	24
15.	<i>Asignación de módulos a residentes.</i>	25
16.	<i>Estructura de la carpeta “CASOS”.</i>	26
17.	<i>Esquema de la base de datos.</i>	26
18.	<i>Instrumentos del proyecto REDCap.</i>	27
19.	<i>Informe del instrumento MÓDULOS de REDCap.</i>	27
20.	<i>Registro de especialistas.</i>	27
21.	<i>Función para exportar registros.</i>	29
22.	<i>Matriz de confusión.</i>	31
24.	<i>Cálculo de Kappa.</i>	32
25.	<i>Interpretación del resultado de Kappa.</i>	32

26.	<i>Coeficiente de Sørensen-Dice (DSC)</i>	32
27.	<i>Coeficiente IoU</i>	33
29.	<i>Cálculo de la similitud</i>	33
30.	<i>sliceCallBack('INIT')</i>	34
31.	<i>sliceCallBack('OPENNEWPLANC', etc)</i>	35
32.	<i>sliceCallBack('CONTOURMODE')</i>	35
33.	<i>Cambio de contraste</i>	36
34.	<i>Herramienta de zoom</i>	36
35.	<i>Cambiar de slice</i>	36
36.	<i>Selección de estructura</i>	37
37.	<i>Lista de estructuras</i>	37
38.	<i>Creación del desplegable</i>	37
39.	<i>Se comprueba si la estructura existe</i>	38
40.	<i>Se crea o se continúa con la estructura seleccionada</i>	38
41.	<i>Pencil y brush</i>	38
42.	<i>Copiar y pegar contornos</i>	39
43.	<i>Ejemplo de pista para la segmentación del esófago</i>	39
44.	<i>Finalizar segmentación</i>	39
45.	<i>Barra de estado</i>	40
46.	<i>Ejemplo de resultados de las métricas</i>	41
47.	<i>Cálculo de la calificación</i>	41
48.	<i>Métricas de comparación</i>	42
49.	<i>Visualizar estructuras</i>	42
50.	<i>Cambiar de vista</i>	43
51.	<i>Seguir segmentando</i>	43
52.	<i>Logo de la aplicación TUSTOOL</i>	43

53.	<i>Pantalla inicial.</i>	44
54.	<i>Registro e inicio de sesión</i>	44
55.	<i>Menú principal</i>	45
56.	<i>Mensajes de ayuda.</i>	46
57.	<i>Se eliminan las estructuras no seleccionadas en un estudio PET.</i>	47
58.	<i>Se guarda el nuevo fichero y se elimina el temporal.</i>	47
59.	<i>Crear nuevos casos.</i>	47
60.	<i>Selección de caso a segmentar.</i>	48
61.	<i>Estructura de la carpeta de casos.</i>	49
62.	<i>Comenzar a segmentar</i>	49
63.	<i>Alumno seleccionado por el especialista.</i>	50
64.	<i>Visualización de resultados para alumnos.</i>	51
65.	<i>Perfil del alumno.</i>	52
66.	<i>Mensaje de alerta.</i>	52
67.	<i>Pantalla inicial</i>	59
68.	<i>Gestión de usuarios</i>	59
69.	<i>Segmentación tumoral</i>	60
70.	<i>Visualización de resultados</i>	60
71.	<i>Configuración del perfil</i>	61
72.	<i>Funciones del especialista</i>	61
73.	<i>Coeficiente DSC.</i>	82
74.	<i>Precisión.</i>	82
75.	<i>Sensibilidad.</i>	82
76.	<i>Similitud.</i>	83
77.	<i>Coeficiente IoU.</i>	83
78.	<i>Calificación.</i>	83

1. Introducción y objetivos

1.1. Motivación

La oncología radioterápica es una especialidad médica que estudia la epidemiología, prevención, patogenia, clínica, diagnóstico, tratamiento y valoración pronóstica de las neoplasias. Su objetivo es el empleo de las radiaciones ionizantes en el tratamiento del cáncer, en un contexto multidisciplinar e integrador del estudio y tratamiento de la enfermedad neoplásica [1]. Después de la cirugía, la radioterapia es el tratamiento más importante frente a la lucha contra el cáncer. El objetivo del tratamiento radioterápico es el control loco-regional de la enfermedad y, por tanto, la curación de la misma cuando no está en fase de diseminación. Los avances en las imágenes diagnósticas, la evolución y localización de tumores en los aceleradores lineales hace posible que el tratamiento sea cada vez más preciso y eficaz.

Entre otros avances tecnológicos se encuentra la mejora de los sistemas de simulación mediante el uso de sistemas de TC (Tomografía Computerizada). La información proveniente del TC y de la RM (Resonancia Magnética) facilita la localización del volumen tumoral. El proceso de planificación de la radioterapia comienza con el contorneo de la lesión para definir la zona a tratar, siendo este un proceso complejo. La eficacia del tratamiento depende en gran medida de esta tarea y de la exactitud y precisión de la misma. De esta forma, realizar un contorneo más extenso de lo estrictamente necesario puede resultar en un mayor número de efectos secundarios o, por el contrario, un contorneo más limitado puede suponer una pérdida del control tumoral [2] [3].

Los sistemas de software para la delimitación del volumen de tratamiento y de los órganos de riesgo son un punto clave en el proceso de planificación del tratamiento radioterápico, ya que en base a esta definición se realizará la posterior dosimetría física, que es en sí el tratamiento que se administra al paciente. La posibilidad de fusionar diferentes modalidades de imagen (TC, PET-TC (Tomografía por Emisión de Positrones), RM) mejora la delimitación de las lesiones. Los planificadores incluyen sistemas de segmentación que son capaces de reconocer órganos sanos y contornearlos, lo cual no ocurre hoy en día con el volumen tumoral o target [4][5].

En 1928, la Asociación Médica Americana de Cirugía publica *Lo esencial de las residencias e internos*, la primera publicación oficial de programas de formación de residentes, haciendo hincapié en su importancia para una adecuada capacitación de los cirujanos [6][7]. Con el desarrollo de nuevas tecnologías en el ámbito médico, ha surgido la necesidad de crear proyectos de formación integral de médicos residentes en técnicas quirúrgicas innovadoras como la cirugía robótica (Sistema quirúrgico Da Vinci) que permite realizar operaciones de forma mínimamente invasiva [8][9], o la tele-cirugía que hace posible operar a distancia [10]. De la misma manera que ocurre con los programas de entrenamiento de cirujanos en técnicas quirúrgicas, en oncología radioterápica, es imprescindible una adecuada formación en la delimitación de lesiones. Para ello, en el periodo formativo, los residentes realizan rotaciones por cada una de las patologías tumorales. Sin embargo, su curva de aprendizaje se ve supeditada al número de pacientes diagnosticados en el

momento de su rotación. Esto, por ejemplo, se ve afectado en períodos como el ocurrido durante la pandemia, donde el número de diagnósticos descendió considerablemente y los servicios quirúrgicos limitaron las intervenciones por escasez de unidades de cuidados intensivos siendo el flujo de pacientes a los servicios de oncología radioterápica enlentecido. Por esto, y por la necesidad de una mejora en el entrenamiento en delimitación de los tumores de los residentes surge este proyecto.

Actualmente, los esfuerzos de investigación se enfocan en la creación de segmentación tumoral automática o semiautomática. El objetivo final es conseguir un adecuado contorneo eliminando la variabilidad interobservador, así como el tiempo y esfuerzo que supone a los oncólogos radioterápicos el adecuado contorneo de los volúmenes tumorales mediante la introducción de algoritmos autónomos. No obstante, aunque los algoritmos de inteligencia artificial basados en machine learning o deep learning ofrecen un gran potencial para alcanzar la solución buscada [11][12], aún queda un largo camino para conseguirlo. Por ello, es imprescindible la implantación de sistemas de apoyo a la formación de los médicos residentes de forma que la calidad de sus contorneos no dependa únicamente del número de pacientes diagnosticados durante el momento de su rotación. Incluso cuando se perfeccionen e implanten los algoritmos automáticos de segmentación en el ámbito clínico, dicho entrenamiento seguirá siendo necesario para supervisar la calidad del contorneo y evitar los posibles daños al paciente derivados de un fallo en la delimitación automática de la lesión y los OAR (Organs At Risk).

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es desarrollar una aplicación que constituya una herramienta formativa de segmentación tumoral para médicos residentes. Permite a sus usuarios realizar contorneos sobre imágenes de distintas modalidades (TC, RM, PET) de diferentes tumores. Dicha estructura segmentada es comparada con un gold standard realizado por el consenso de un oncólogo radioterápico y un radiólogo experto y se proporciona una calificación como resultado del cálculo de parámetros geométricos y estadísticos. El resultado de la comparación reflejará la precisión del contorneo, así como los puntos de error de los que el usuario puede aprender. Así mismo, los usuarios pueden seleccionar casos de dificultad creciente a medida que aprenden y mejoran con la práctica. Se trata de un software que puede estar disponible en el área de formación del centro, así como en los ordenadores personales de los médicos residentes de forma que se asegure la continuidad del aprendizaje incluso en situaciones excepcionales como la pandemia actual, incorporándose a su proceso formativo. Esta aplicación es fruto de una colaboración entre la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación y el departamento de Oncología Radioterápica del Hospital Universitario Ramón y Cajal.

1.2. Contexto clínico

1.3. Estado del arte

La primera fase de este trabajo ha consistido en buscar en el estado del arte otras experiencias o aplicaciones para el entrenamiento de oncólogos radioterápicos. Para ello se ha recurrido a

buscadores de artículos científicos con palabras clave como “*radiation oncology*”, “*contouring training tool*”, “*radiotherapy planification*”, “*tumor segmentation*”, etc. De esta forma, se encontraron numerosas plataformas de segmentación tumoral en el ámbito de la oncología radioterápica pero solo cuatro de ellas ofrecían realimentación a los usuarios, corrigiendo sus fallos y evaluando la precisión de los contorneos realizados.

1. **EduCase®:** [13, 14] Es una herramienta de entrenamiento desarrollada por RadOnc eLearning Center Inc. para ayudar a oncólogos radioterápicos, físicos médicos y dosimetristas a mejorar sus habilidades de segmentación de estructuras y planificación de tratamiento. Es usada por sociedades profesionales de oncólogos radioterapeutas como parte de cursos en los que un mentor segmenta estructuras de aquellos casos clínicos que seleccione y supervisa la evolución de sus alumnos a medida que van contorneando las estructuras de interés en las distintas sesiones. EduCase es accesible a través del portal de RadOnc sLearning. Es un software muy completo con una interfaz de usuario que ofrece una gran variedad de herramientas de segmentación para el usuario (y otras utilidades extra únicamente disponibles para el rol de administrador). Además, el administrador puede diseñar la asignación de tareas que considere oportunas para los estudiantes. Por su parte, los alumnos utilizarán las herramientas disponibles para desarrollar dichas tareas, tras lo cual, sus estructuras serán calificadas mediante métricas de semejanza (DICE Similarity Metric (DSM), JACCARD Similarity metric (JSM), Line Domain Similarity Metric (LSM)).
2. **EduMods®:** [15, 16] Este programa emplea el software de Educase para crear módulos web educativos que entrenan y evalúan las habilidades implicadas en los procesos de radioterapia. Este programa está basado en los principios del aprendizaje activo en el entorno real de trabajo:
 - 2.1 Simulación de trabajo: EduMods recrea en entorno en el que trabajan los oncólogos radioterápicos durante la planificación del tratamiento y la interpretación de los estudios de imagen médica.
 - 2.2 Guías de referencia: Cada módulo contiene un atlas de imágenes y resúmenes que dan al usuario la información necesaria para dominar las habilidades del tema en cuestión.
 - 2.3 Evaluaciones: Cada módulo contiene dos evaluaciones: Un examen de contorno que se califica mediante análisis métricos y un examen de texto con imágenes asociadas.
3. **TCM Academy Image Reporting Simulator®:** [17] Esta Plataforma para radiólogos que proporciona una gran variedad de módulos que incluyen casos clínicos de una estructura anatómica concreta. Dichos módulos ofrecen material de aprendizaje sobre las patologías que pueden afectar a esa región anatómica y cómo identificarlas en imágenes médicas. Así mismo, cada caso presenta un informe a llenar por el usuario. En función del número de aciertos se va completando la gráfica de progreso del usuario, la cual debe superar una calificación concreta para que el alumno pueda pasar al siguiente caso.
4. **eContour®:** [18, 19] Se trata de una novedosa herramienta web interactiva y de acceso público cuya misión es mejorar la calidad de los tratamientos radioterápicos para optimizar

sus resultados. Presenta una interfaz que permite al usuario seleccionar las segmentaciones de las estructuras de interés, así como superponer imágenes y visualizar las distribuciones de las dosis de radiación.

No obstante, todas las herramientas mencionadas, excepto el programa eContour, son de pago por lo que no están al alcance de todos los médicos residentes interesados en su uso.

1.4. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es desarrollar una herramienta para entrenar a los médicos residentes en la delimitación de tumores sobre imágenes de TC, RM y PET y generar una realimentación objetiva mediante la comparación cuantitativa con la delimitación hecha por un experto radiólogo. El objetivo secundario de la plataforma es la supervisión y seguimiento continuo de la evolución de los residentes en el ámbito de segmentación tumoral por parte de los médicos especialistas que los forman.

2. Materiales y métodos

2.1. Especificación funcional del sistema

Los requerimientos o requisitos de un sistema describen los servicios que da el sistema y las restricciones asociadas a su funcionamiento. A la hora de diseñar un sistema es importante determinar de forma precisa los requisitos funcionales y no funcionales que deben satisfacerse tanto en el software como en el hardware.

2.1.1. Identificación de roles de usuario

Para delimitar el sistema y definir su alcance se deben identificar los actores que interactuarán con él. Los actores son entidades externas al propio sistema que se modela. Puede ser una persona, un grupo de personas, otro sistema o una máquina. En el caso de la aplicación en cuestión, se distinguen dos roles de usuario:

1. Primarios:

Los actores primarios serán tanto los médicos residentes como los especialistas en oncología radioterápica ya que ambos interaccionan directamente con el sistema para explotar su funcionalidad. Aunque el rol de especialista como actor primario no sea tan evidente, cabe destacar que éstos también se benefician del sistema: La información sobre la evolución de los alumnos facilita la toma de decisiones del especialista con respecto a las calificaciones y conclusiones sobre el trabajo de los alumnos.

2. Secundarios:

Los actores secundarios serán nuevamente los médicos especialistas ya que dan soporte al sistema proporcionando nuevos casos de estudio.

2.1.2. Especificación de requisitos

De acuerdo con las conclusiones obtenidas en el Trabajo de Fin de Grado de Nuria Barrios, y teniendo como objetivo principal cubrir las necesidades de formación de los médicos residentes en el ámbito de la oncología radioterápica, se han determinado una serie de requisitos que se exponen a continuación.

1. Requisitos funcionales: Expresan la naturaleza del funcionamiento del sistema, es decir, cómo interacciona el sistema con su entorno y cuál va a ser su estado y su funcionamiento. En ocasiones, también es conveniente indicar lo que **no** hará el sistema. En definitiva, los requisitos funcionales definen **qué debe** hacer un sistema. Los requisitos funcionales de la aplicación a desarrollar son los siguientes:

- La herramienta es una aplicación de escritorio que será compatible con Windows y posteriormente migrable a otros entornos como IOS o Linux.
- El sistema almacenará los datos de los usuarios que se registren y, una vez registrados, se permitirá el acceso de los usuarios introduciendo su nombre de usuario y contraseña.
- La aplicación permitirá que los especialistas vean la evolución de cualquier alumno que esté registrado en el sistema. Los resultados se mostrarán de forma clara, aplicando filtros hasta mostrar los resultados del caso de interés.
- La herramienta dará la posibilidad a los especialistas de incluir nuevos casos de pacientes con las estructuras de segmentación de referencia y organizados en módulos por patología y dificultad.
- La aplicación permitirá a los alumnos seleccionar entre los casos que tengan asignados y segmentarlos con un conjunto de herramientas predeterminadas.
- Los casos a segmentar podrán incluir mensajes de ayuda para facilitar a los alumnos la identificación de las estructuras.
- El sistema filtrará los módulos habilitados para el alumno en función de su año de residencia.
- El sistema no permitirá que se segmente el mismo caso dos veces el mismo día para evitar que memoricen la solución.
- Los casos a segmentar podrán incluir mensajes de ayuda para facilitar a los alumnos la identificación de las estructuras.
- Una vez segmentado un caso, el sistema realizará una serie de comparaciones entre el contorno y su Gold Standard y mostrará los resultados, así como la calificación final, el significado de los distintos parámetros calculados.
- El sistema no requerirá que el alumno segmente todas las estructuras de un caso para darlo por completado. Además, permitirá acceder a las modalidades disponibles para cada caso de forma independiente.
- En todo momento la aplicación proporcionará pestañas de ayuda para la utilización de la interfaz.
- Se evitarán posibles errores mediante mensajes de alerta y consultas.

2. Requisitos no funcionales: Establecen los límites o restricciones sobre el comportamiento del sistema. Este tipo de requisitos no hacen referencia a las funciones específicas del sistema sino a las propiedades del mismo. Es decir, definen **cómo** debe ser el sistema. De acuerdo con la clasificación definida por Somerville, se pueden distinguir requisitos del producto, requisitos organizacionales y requisitos externos. El sistema en cuestión especifica los siguientes requisitos no funcionales:

- El diseño de la aplicación será, en la medida de lo posible, sencillo e intuitivo. Su funcionamiento será fácil de aprender de manera que, tras una primera toma de contacto, el usuario recordará fácilmente los pasos a seguir sin demasiado esfuerzo.

- Con el objetivo de evitar un consumo excesivo de recursos de memoria y para permitir el acceso remoto a los resultados de las segmentaciones, los datos generados por la aplicación se almacenarán en una base de datos remota.
- Con el objetivo de mejorar la eficiencia, el sistema solo importará el caso que seleccione el usuario para segmentar en cada momento.
- La aplicación debe utilizar software que no necesite licencias o cargos por suscripción.
- Es necesario estar conectado a internet durante el uso de la herramienta para permitir la comunicación con la base de datos.
- Dado que se trata de una aplicación de escritorio, el sistema estaría disponible para cualquier usuario que tenga instalada la herramienta y el repositorio de casos.
- La aplicación informará al usuario en caso de que quiera abandonar un proceso que no está finalizado, preguntándole si quiere abandonar el proceso o continuar.
- Ningún usuario podrá acceder a la aplicación sin sus claves correspondientes.
- Los alumnos podrán auto-registrarse desde la propia aplicación mientras que los especialistas deberán registrarse de forma externa introduciendo sus datos directamente en la base de datos.

2.2. Diseño de la aplicación

A continuación, se especifica la interacción externa e interna de los actores involucrados y la arquitectura física del sistema. La aplicación cuenta con dos tipos de interfaces distintas con sus correspondientes funcionalidades en función de si el usuario es un médico residente o un médico especialista.

2.2.1. Arquitectura del sistema

En la Figura 1 se representa la arquitectura de la aplicación. La herramienta se instala en el escritorio de los ordenadores de los médicos residentes, así como en los de los oncólogos radioterápicos. A través de la API REST de REDCap, la aplicación interacciona con la base de datos del servidor del Hospital Ramón y Cajal, permitiendo la importación y exportación de datos (records) de las distintas tablas.

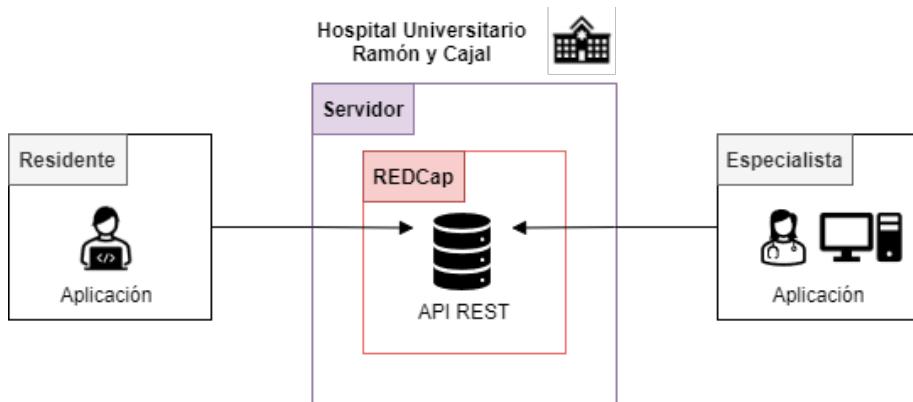


Figura 1: Arquitectura del sistema

2.2.2. Modelado UML

Los diagramas de Lenguaje Unificado de Modelado (UML) se emplean para detallar el estado del sistema y las interacciones que se dan entre los elementos que lo componen.

1. Diagramas de caso de uso

Los diagramas de casos de uso proporcionan una visión gráfica del comportamiento que tiene el software del sistema en respuesta a eventos realizados por actores externos. Son una de las técnicas para especificar los requerimientos funcionales del software, es decir, describen lo que el software debe hacer y para quién. Estará compuesto por los casos de uso, los actores que intervienen y la interrelación entre los elementos.

De acuerdo con las funcionalidades del sistema, en la aplicación se pueden distinguir cuatro casos de uso principales: gestión de usuarios, visualización de resultados, segmentación tumoral y conversión de nuevos casos. (Figura 2)

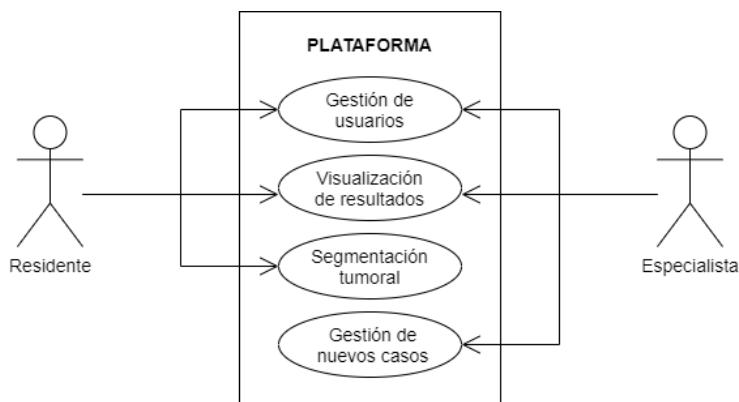


Figura 2: Diagrama de casos de uso

2. Diagramas de secuencia

Un diagrama de secuencia muestra la interacción de los componentes de un sistema a lo largo del tiempo y se modela para cada caso de uso. La aplicación en cuestión contiene

sucesivas llamadas del usuario al sistema para visualizar datos, para contornear nuevos casos y guardar los resultados o para importar nuevos casos en el sistema.

De acuerdo con los casos de uso ya mencionados, a continuación, se detallan los cuatro diagramas de secuencia correspondientes.

En el diagrama de secuencia relativo a la **gestión de usuarios** (Figura 3) se ha establecido que todos los residentes se deberán registrar ingresando sus datos personales únicamente la primera vez que acceden al sistema. Tras el previo registro, los usuarios contarán con un nombre de usuario y contraseña único para cada uno que se comprobará en la base de datos de REDCap cuando este intente acceder al sistema. En caso de que las credenciales introducidas coincidan con las almacenadas en la base de datos, el usuario podrá comenzar a usar la aplicación, en caso contrario, saltará un mensaje de error. Por su parte, los especialistas deberán registrarse introduciendo sus datos en un nuevo registro directamente desde REDCap.

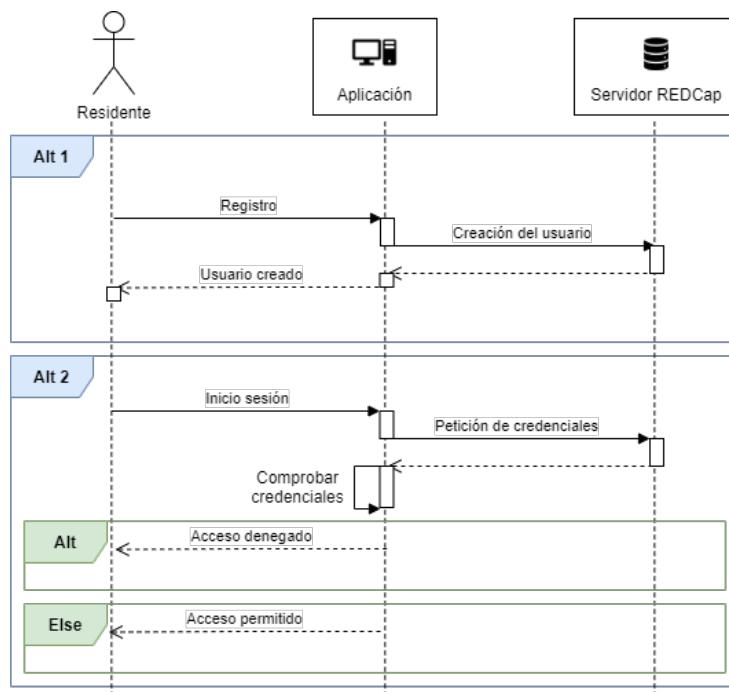


Figura 3: Diagrama de secuencia para la gestión de residentes

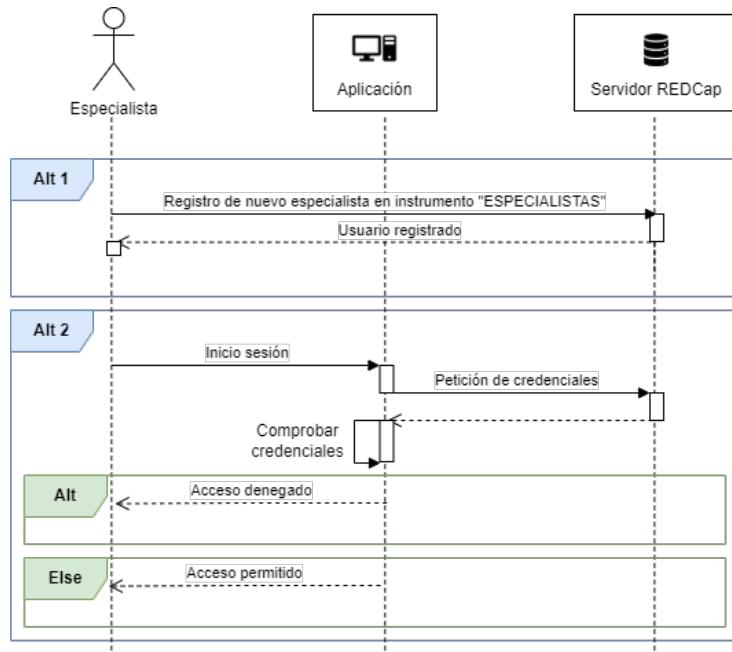


Figura 4: *Diagrama de secuencia para la gestión de especialistas*

En segundo lugar, cabe destacar que se vuelve a hacer una distinción en el flujo de mensajes relativo a la **visualización de resultados** en función del usuario. Los residentes podrán ver las calificaciones medias obtenidas para cada módulo disponible. Además, accediendo a cada caso segmentado, los residentes podrán visualizar un resumen de las métricas obtenidas, así como la descripción del caso (Figura 5). Por su parte, los especialistas contarán con un primer paso adicional que consiste en la selección del alumno. Una vez se ha elegido el alumno, el especialista podrá visualizar los resultados correspondientes a cada caso segmentado por dicho alumno (Figura 6).

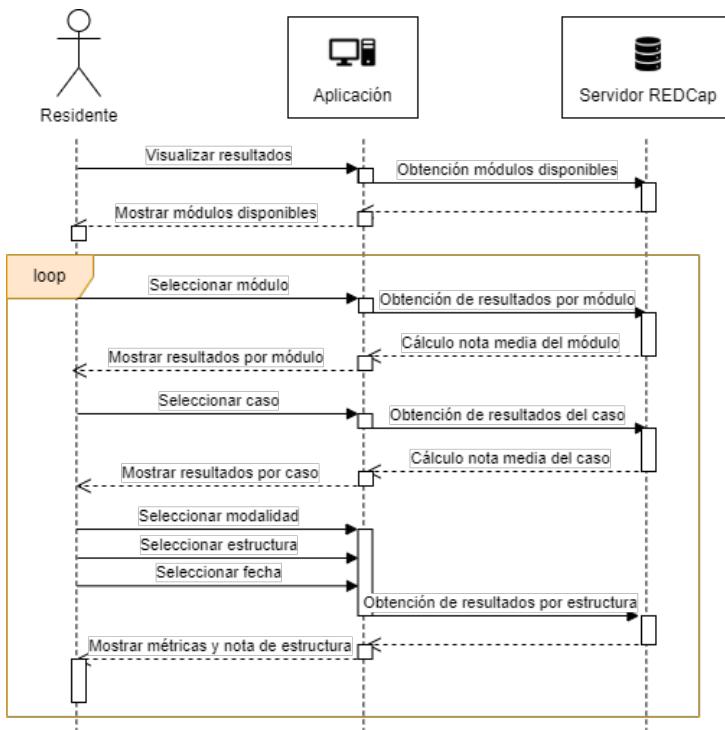


Figura 5: Diagrama de secuencia para la visualización de resultados (rol alumno)

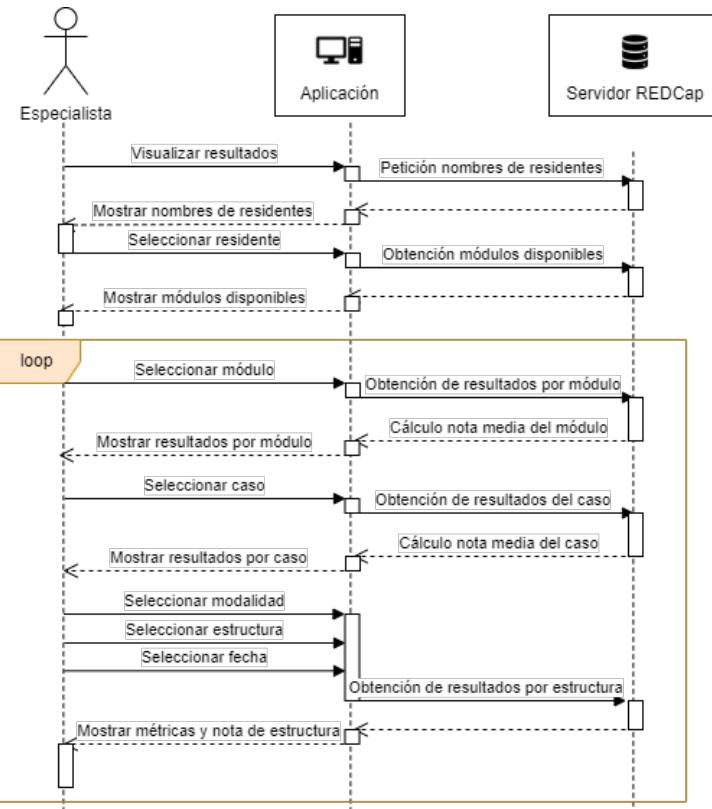


Figura 6: Diagrama de secuencia para la visualización de resultados (rol especialista)

El diagrama de secuencia para la **segmentación tumoral**, solo se implementará para

el rol de residente ya que es una funcionalidad exclusiva de este actor. En este caso, se incluirá un nuevo componente que interacciona con el sistema: el repositorio local. En este repositorio se almacenan los ficheros correspondientes a los casos creados. En primer lugar, el usuario selecciona un módulo y un caso concreto de dicho módulo y la modalidad que desee segmentar. La aplicación recupera del repositorio local su fichero correspondiente y de la base de datos otra información de interés del caso. Una vez finalizada la segmentación y calculadas las métricas de comparación con las estructuras de referencia, el sistema importará los resultados en la base de datos del servidor del hospital (Figura 7).

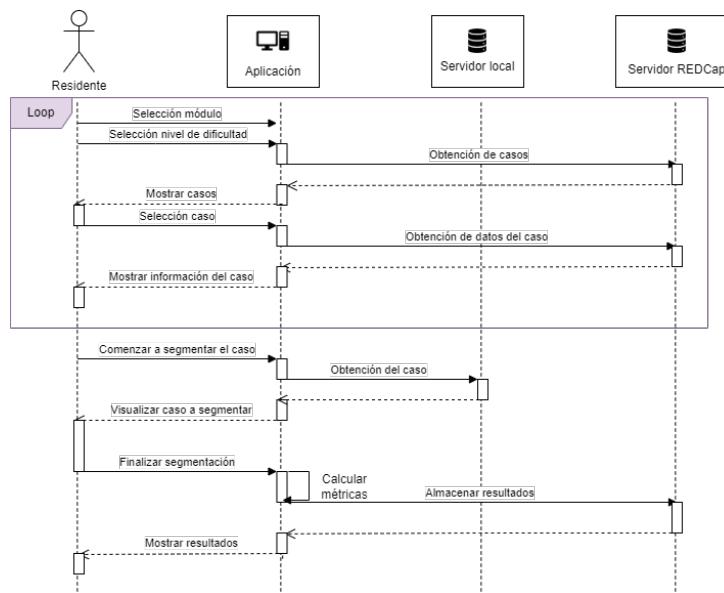


Figura 7: Diagrama de secuencia para la segmentación tumoral

Por otro lado, desde la aplicación el especialista tiene la posibilidad de **incluir nuevos casos DICOM**. Para ello, el usuario selecciona el caso de su carpeta local y lo importará en el sistema. A continuación, la aplicación le pedirá que introduzca una serie de datos relativos al caso, los cuales posteriormente serán almacenados en la base de datos REDCap. Finalmente, se cargará el caso y se volverá a guardar en la carpeta local que indique el usuario. (Figura 8)

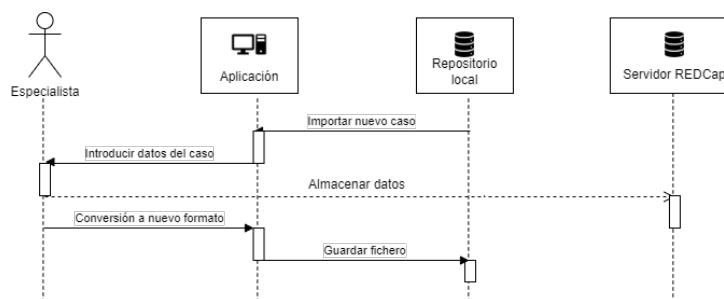


Figura 8: Diagrama de secuencia para la creación de nuevos casos

2.2.3. Diagramas Black Box

Los diagramas de caja negra representan las entradas y salidas del sistema, sin tener en cuenta su funcionamiento interno. Su finalidad es valorar el sistema desde el punto de vista del usuario. En el siguiente diagrama de Black Box tipo 1 se detallan los principales bloques de la aplicación:

- **Segmentación:** Se corresponde con la funcionalidad principal de la aplicación y hace referencia a la interfaz desde la que el médico residente va a realizar las segmentaciones de las lesiones tumorales.
- **Resultados:** Los residentes pueden acceder a los resultados de la comparación de cada caso segmentado con su correspondiente Gold Standard mientras que los especialistas pueden ver esa misma información de cualquier residente registrado en el sistema.
- **Nuevos casos:** Hace referencia a la creación de nuevos ficheros a partir de casos en formato DICOM para que posteriormente sean segmentados por los residentes.

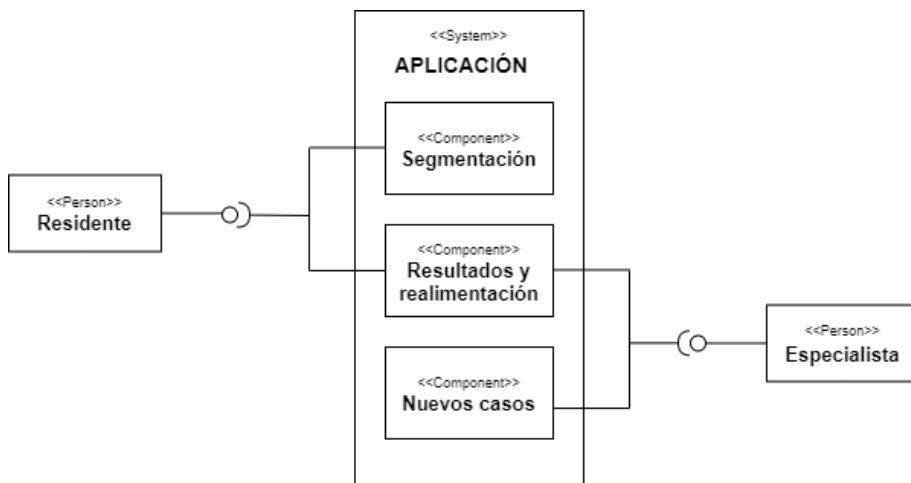


Figura 9: *Diagrama de caja negra*

2.2.4. Diagramas White Box

Los diagramas de caja blanca representan la estructura interna del sistema. En el diagrama se pueden observar las relaciones entre los distintos componentes del sistema, cuál es el flujo que siguen los datos y cuáles de los componentes se muestran al usuario a través de la interfaz.

Dado que los módulos y, por tanto, las relaciones entre ellos cambian en función del rol que el usuario desempeñe, se ha creado un diagrama para cada uno de ellos. Ambos diagramas presentan el bloque de **interfaz de usuario**, bloque de **autentificación** (gestión de usuarios), el bloque de **visualización de resultados** y un componente adicional de **comunicación con REDCap**. No obstante, como se puede observar, en el caso del médico residente existe un componente principal

para la **segmentación tumoral**. Por su parte, los especialistas cuentan con un componente para la creación de nuevos casos así como un bloque de **comunicación con el repositorio local** que se encarga de almacenar los casos de estudio.

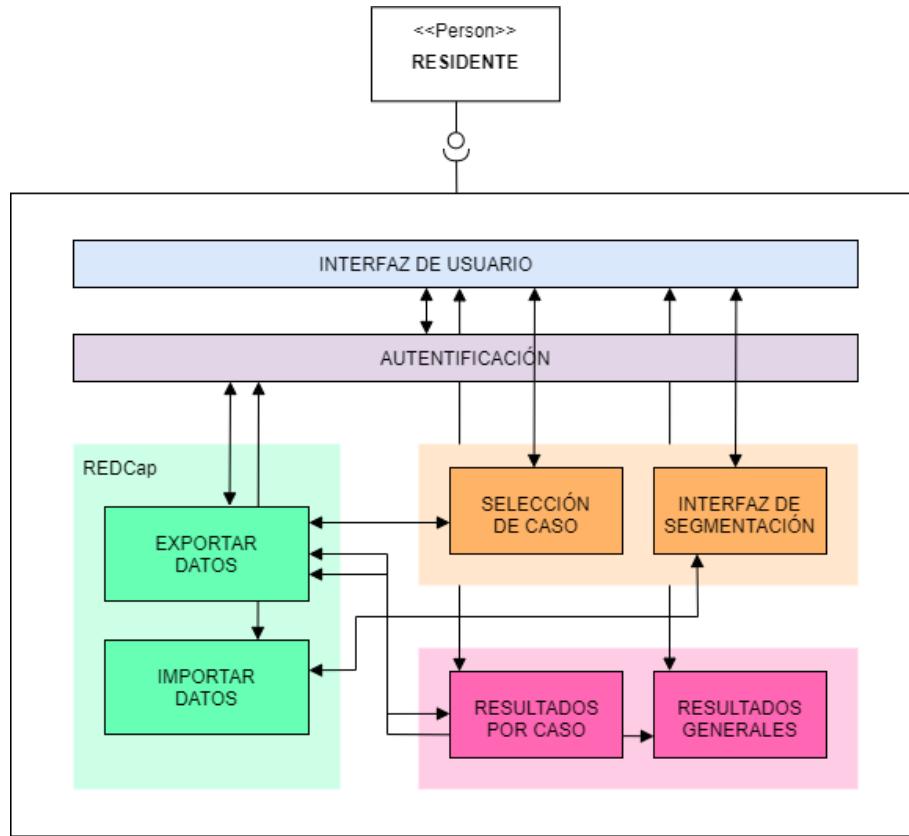


Figura 10: *Diagrama de caja blanca (rol alumno)*

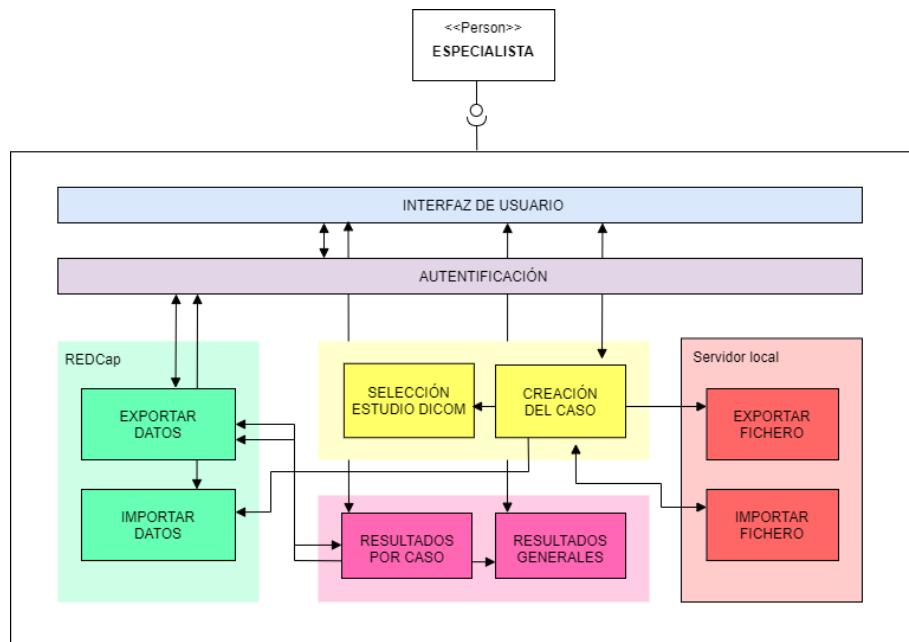


Figura 11: *Diagrama de caja blanca (rol especialista)*

2.2.5. Bocetos y prototipado

Una vez se definieron los requisitos y funcionalidades principales del sistema, se desarrollaron los bocetos (con la herramienta Canva®) y se fueron modificando hasta obtener el prototipo final de la aplicación. Para asegurar que todas la utilidad y usabilidad del sistema, los detalles del prototipo se han consultado con la tutora médica del servicio de oncología Carolina de la Pinta (Capturas disponibles en el anexo III).

2.3. Tecnologías empleadas

En esta sección se especificarán las distintas herramientas y lenguajes de programación empleadas para el desarrollo de la aplicación de escritorio a la que se le ha denominado *TUSTOOL* (Tumor Segmentation Training TOOL). Una vez analizados el estado de arte, los requisitos funcionales y no funcionales se ha decidido que la herramienta se desarrollará con MATLAB, mientras que la base de datos remota será REDCap.

2.3.1. Matlab

En este TFG se ha elegido MATLAB como principal entorno de desarrollo debido a la necesidad de realizar numerosos cálculos matemáticos y estadísticos así como operaciones entre matrices binarias a la hora de comparar las segmentaciones de las estructuras de cada caso con sus estructuras de referencia. La versión empleada ha sido **MATLAB R2021a**.

MATLAB dispone de un entorno para el diseño interactivo de programas o aplicaciones, conocido como **App Designer**. Este entorno permite agilizar la creación y diseño de los elementos que componen las interfaces de la aplicación. MATLAB App Designer genera automáticamente el código correspondiente a cada elemento gráfico introducido y también facilita la creación de funciones o *Callbacks* asociadas a la interacción del usuario con dichos elementos [20].

2.3.2. CERR

CERR (Entorno Computacional para la Investigación Radiológica) es un software desarrollado en MATLAB para el desarrollo e intercambio de resultados de planificaciones de tratamiento radioterápico en imágenes médicas [21]. Se trata de una herramienta de código abierto muy completa que incluye una gran variedad de componentes funcionales, entre los que destacan:

- Módulo para la **converión de casos** en formato DICOM a ficheros de tipo *matfile* que facilita su manipulación.
- Módulo para la **visualización de los cortes** (axial, coronal y sagital) de imágenes médicas, estructuras contorneadas, líneas de isodosis etc.

- Herramientas para el **contorneo** de estructuras anatómicas.

Para este proyecto, se ha reutilizado y modificado el código correspondiente a estos tres módulos, adaptándolo a las necesidades de la aplicación [22].

CERR utiliza ficheros con un formato concreto para almacenar toda la información de cada estudio DICOM (las imágenes, datos del escáner, cabeceras DICOM, el tamaño del voxel, información de las estructuras segmentadas, etc). Estos archivos de extensión .mat son archivos de MATLAB® binarios que almacenan variables del espacio de trabajo. En este caso, CERR genera un fichero, que contiene la variable *planC*, del que recuperará y en el que almacenará información del caso. En el desarrollo de esta herramienta, se ha añadido una nueva variable de trabajo denominada *ref* que almacenará los contorneos realizados por el especialista (Ver sección 3.2.2). Debido a la gran cantidad de datos almacenados, la variable *planC* tiene una estructura compleja: *planC* es una variable de tipo *cell* (array de celdas) que contiene 25 celdas.

Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado únicamente la información contenida en la cuarta celda *planC{1,4}* ya que es la información de las estructuras contorneadas. A su vez, esta estructura está compuesta por 34 campos o columnas y tantas filas como estructuras tenga el caso. Entre estos campos, los de mayor interés para la herramienta implementada son:

1. ***structureName***: Contiene el nombre de la estructura.
2. ***contour***: Contiene un array con una variable de tipo *struct* por cada *slice* que contendrá una matriz con la información relativa al contorneo, si hay alguno.
3. ***rasterSegments***: Contiene una matriz con la información de todas las estructuras segmentadas (numero del corte en el que se encuentran, píxeles sobre los que pasa el trazo, centímetros de profundidad del corte, etc).
4. ***orientationOfStructure***: El tipo de vista sobre el que se han contorneado las estructuras (Transversal, coronal o sagital).
5. ***DICOMHeaders***: Contiene toda la información de las cabeceras del archivo DICOM del caso.
6. ***visible***: Toma el valor “1” si la estructura es visible en los visores y “0” si no lo es.

2.3.3. REDCap

REDCap (*Research Electronic Data Capture*) es una plataforma web para la creación y administración de encuestas y bases de datos. REDCap permite tanto la importación como la exportación de datos de forma *online*, por lo que se convierte en una herramienta óptima para la investigación clínica [23].

Entre las funcionalidades de las que dispone REDCap, cabe destacar la creación de proyectos con múltiples instrumentos o el *dashboard* de recogida de datos. Además, esta plataforma cuenta con una API (*Application Programming Interfaces*) que permite que aplicaciones externas, como MATLAB, se comuniquen con REDCap de forma remota [24]. Esta funcionalidad será útil a la hora de realizar importaciones y exportaciones de datos automatizados desde la aplicación a través del protocolo HTTP.

La *API Playground* es una herramienta que permite al usuario experimentar con la API REDCap y ver el rango de su funcionalidad sin siquiera tener que escribir ningún código. De esta forma, seleccionando las distintas opciones de la interfaz es posible crear y ejecutar consultas, así como conocer las respuestas a dichas consultas [25].

Las siguientes imágenes muestran un ejemplo de exportación del instrumento “CASOS” de la base de datos, así como su implementación en lenguaje *cURL* (que será el empleado en las consultas desde MATLAB).

(a) Opciones de exportación.

(b) Código en cURL

```
#!/bin/sh
DATA="token=C198153F795F091F7D41AA81E1528C&content=record&action=export&format=json&type=flat&svDelimiter=&svLabel=&svValue=&svName=&svHeader=false&exportCheckboxLabel=false&exportSurveyFields=false&exportDataTables=false&returnFormat=json"
$CURL="which curl"
$CURL "-H \"Content-Type: application/x-www-form-urlencoded\" \
-H \"Accept: application/json\" \
-X POST \
-d $DATA \
https://biinfo.irycis.org/redcap/api/
```

Figura 12: *Ejemplo de export desde API playground.*

En respuesta se obtendrán todos los datos almacenados en la tabla “CASOS” en formato JSON, tal y como se ha establecido en las opciones de la figura 12a.

Por otro lado, a continuación se muestra un ejemplo de importación de un registro en el instrumento “ESPECIALISTAS” de la base de datos y su correspondiente implementación en *cURL*.

(a) Opciones de importación.

(b) Código en cURL

Figura 13: *Ejemplo de import desde API playground.*

En este caso, la respuesta será “*count*”:1 tal y como se especificó en las opciones de la figura 13a.

Para las pruebas técnicas realizadas se ha empleado servidor REDCap del Hospital Universitario Ramón y Cajal.

2.3.4. Anonimizador de casos.

La protección de Datos personales es un derecho fundamental recogido en el artículo 18.4 de la Constitución Española y regulado por el Reglamento Europeo de Protección de Datos (RGPD) [26], y la Ley de protección de datos (LOPDGDD) [27].

En el ámbito sanitario, la normativa en protección de datos se complementa con la Ley de Autonomía del Paciente 41/2002, de 14 de noviembre [28].

De acuerdo con esta normativa, se decidió anonimizar los casos del Hospital Universitario Ramón y Cajal con los que va a trabajar la plataforma antes de convertirlos a ficheros .mat.

En este caso, para anonimizar los casos se ha empleado la herramienta desarrollada por Daniel Capellán dentro de su Trabajo Fin de Titulación en el Grado de Ingeniería Biomédica de la UPM.

3. Resultados

3.1. Modelo de datos

En esta sección se explicará el plan formativo diseñado para la herramienta, así como el esquema de la base de datos establecido para la posterior creación de tablas (instrumentos) en REDCap.

A continuación se muestra el diagrama del modelado de datos conceptual de la base de datos (Figura 14).

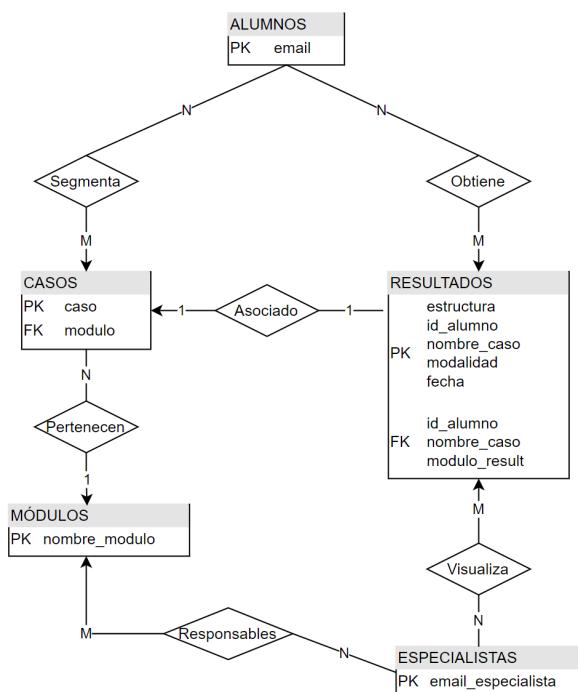


Figura 14: *Modelado de datos conceptual.*

3.1.1. Plan formativo de la herramienta

En esta sección se describen los programas formativos establecidos para los alumnos en función del año de residencia. Se han establecido programas formativos para diferentes patologías y localizaciones, permitiendo adquirir las capacidades necesarias para obtener el título de oncólogo radioterápico finalizados sus cuatro años de residencia.

En el momento de registrarse, los alumnos deberán indicar el año en el que iniciaron la residencia, de forma que, en función del mes y año actual, el sistema pueda actualizar el curso en el que se encuentre el alumno y determinar el plan formativo que le corresponde.

Para este TFG se han definido 14 módulos y se han clasificado en función de su grado de

dificultad. De acuerdo a este criterio, se ha asignado a cada módulo los años de residencia para los que los casos pertenecientes a este módulo estarán disponibles (Figura 15).

MÓDULO	AÑO DE RESIDENCIA			
	PRIMERO	SEGUNDO	TERCERO	CUARTO
SBRT en metástasis óseas	X	X	X	X
SBRT pulmonar			X	X
SBRT renal y adrenal			X	X
Radiocirugía de metástasis cerebrales			X	X
SBRT hepática				X
SBRT pancreática				X
Radioterapia paliativa en metástasis óseas		X		
Radioterapia en cáncer de mama	X	X	X	X
Radioterapia en cáncer de próstata	X	X	X	X
Radioterapia en cáncer de pulmón	X	X	X	X
Radioterapia en tumores cerebrales	X	X	X	X
Radioterapia en cáncer ginecológico	X	X	X	X
Radioterapia en cáncer digestivo			X	X
Radioterapia en cáncer de cabeza y cuello			X	X
Órdenes de riesgo	X			

Figura 15: Asignación de módulos a residentes.

Con el objetivo de asegurar una buena formación de los residentes, resulta imprescindible contar con un "*Gold structure set*" de confianza, que represente un punto de referencia único con el que comparar los contornos de los alumnos. Existen varias estrategias que se pueden adoptar para definir estos "*sets*" de referencia: una delimitación comúnmente acordada por dos o más operadores con la misma experiencia; un "*gold standard*" proveniente de un único especialista con gran experiencia en el ámbito de estudio [29]. Los casos de este proyecto han sido elaborados por la Dra. Carolina de la Pinta, especialista en oncología radioterápica en el Hospital Universitario Ramón y Cajal, la que segmentara las estructuras de interés para los casos seleccionados para las primeras pruebas con *TUSTOOL*. No obstante, una de las grandes ventajas que ofrece esta herramienta es la posibilidad de añadir nuevos casos de trabajo, por lo que cualquier experto o grupo de expertos con acceso a la aplicación podrían añadir nuevos casos o mejorar las segmentaciones de casos ya disponibles.

Para comenzar, se han importado un total de nueve casos: Tres casos pertenecientes al módulo de SBRT hepática; Tres casos del módulo de SBRT pancreática; Tres casos del módulo de órganos de riesgo. Esto se ha hecho utilizando la función de "Crear casos" definida en el apartado 3.2.2. Todos ellos fueron previamente anonimizados y los ficheros *.mat* resultantes se deben almacenar en una carpeta local con una estructura concreta definida en la Figura 61.

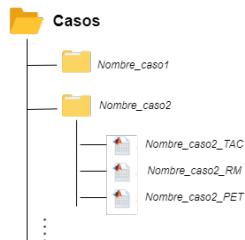


Figura 16: Estructura de la carpeta “CASOS”.

Los médicos especialistas podrán crear nuevos casos siguiendo los mismos pasos y/o modificar la información asociada a cada uno de ellos desde REDCap.

3.1.2. Esquema de la base de datos REDCap

En esta sección se describe el esquema que se ha diseñado para la recogida de datos en REDCap. Mediante la herramienta *Valentina Studio®* se ha creado el siguiente diagrama que muestra el esquema de las tablas que constituyen la base de datos, así como las relaciones entre ellas y los tipos de datos que contienen (Figura 17).

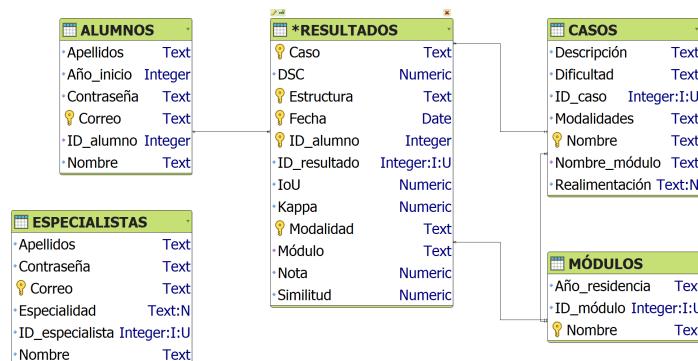


Figura 17: Esquema de la base de datos.

De acuerdo con este esquema, se creó en REDCap un proyecto llamado “**Radioterapia Segmentación**” que incluye un “instrumento” por cada tabla del esquema (Figura 18). Para cada instrumento, se definieron los campos que contiene, definiendo el tipo de datos que almacena y si se trata de un campo obligatorio o no. Además, desde la opción “*Exportación de datos, Reportes y Estadísticas*” se creó también un reporte por cada instrumento, de forma que se pudieran visualizar los datos recogidos en cada uno de ellos por separado.

ALUMNOS	5		Habilitar	Elegir un acción
MODULOS	2		Habilitar	Elegir un acción
CASOS	6		Habilitar	Elegir un acción
RESULTADOS	11		Habilitar	Elegir un acción
ESPECIALISTAS	5		Habilitar	Elegir un acción

Figura 18: *Instrumentos del proyecto REDCap.*

La tabla “MÓDULOS” debe ser previamente rellenada con la información correspondiente a los módulos definidos en el apartado 3.1.1 (Figura 19). El resto de las tablas irán recogiendo los datos generados por la aplicación *TUSTOOL*.

Record ID record_id	Nombre nombre_modulo	Años de residencia			
		1º años_residencia_1	2º años_residencia_2	3º años_residencia_3	4º años_residencia_4
1	SBRT en metástasis óseas	Checked (1)	Checked (1)	Checked (1)	Checked (1)
2	SBRT pulmonar	Unchecked (0)	Unchecked (0)	Checked (1)	Checked (1)
3	SBRT renal y adrenal	Unchecked (0)	Unchecked (0)	Checked (1)	Checked (1)
4	Radiocirugía de metástasis cerebrales	Unchecked (0)	Unchecked (0)	Checked (1)	Checked (1)
5	SBRT hepática	Unchecked (0)	Unchecked (0)	Unchecked (0)	Checked (1)
6	SBRT pancreática	Unchecked (0)	Unchecked (0)	Unchecked (0)	Checked (1)
7	Radioterapia paliativa en metástasis óseas	Unchecked (0)	Checked (1)	Unchecked (0)	Unchecked (0)
8	Radioterapia en cáncer de mama	Checked (1)	Checked (1)	Checked (1)	Checked (1)
9	radioterapia en cáncer de próstata	Checked (1)	Checked (1)	Checked (1)	Checked (1)
10	radioterapia en cáncer de pulmón	Checked (1)	Checked (1)	Checked (1)	Checked (1)
11	Radioterapia en tumores cerebrales	Checked (1)	Checked (1)	Checked (1)	Checked (1)
12	Radioterapia en cáncer ginecológico	Checked (1)	Checked (1)	Checked (1)	Checked (1)
13	Radioterapia en cáncer digestivo	Unchecked (0)	Unchecked (0)	Checked (1)	Checked (1)
14	Radioterapia en cáncer de cabeza y cuello	Unchecked (0)	Unchecked (0)	Checked (1)	Checked (1)
15	Órganos de riesgo	Checked (1)	Unchecked (0)	Unchecked (0)	Unchecked (0)

Figura 19: *Informe del instrumento MÓDULOS de REDCap.*

Para evitar que un alumno se registre como especialista y pueda acceder a las funcionalidades de este, los especialistas deberán introducir sus datos en la tabla “ESPECIALISTAS”, desde la opción “Agregar / Editar registros” (Figura 20).

editing actualmente Record ID 4

Record ID: 4

Nombre: * debe aportar un valor

Apellidos: * debe aportar un valor

Email: * debe aportar un valor

Contraseña: * debe aportar un valor

Especialidad:

Form Status: Incomplete

Buttons: Guardar y Salir, Save & Go To Next Record, --Cancelar--

Figura 20: *Registro de especialistas.*

3.2. Desarrollo

Para el desarrollo de la aplicación *TUSTOOL* se fueron planteando y descartando distintas formas de abordar su implementación. En concreto, se investigó la posibilidad de emplear un servidor PACs (Picture Archiving and Communication System) que almacenara de forma remota tanto la información de los casos y los usuarios como las imágenes DICOM y los archivos .mat de cada caso (herramienta Dicoogle [30]). No obstante, al no encontrar una solución gratuita y fácil de implementar en estos softwares, se decidió utilizar REDCap como base de datos. Además, se probaron distintos lenguajes de programación que actuaran como intermediarios entre MATLAB y la API de REDCap (Python, php y cURL). Finalmente, se optó por el software cURL, ya que es posible integrarlo directamente en MATLAB mediante la función *webwrite()* que manda consultas a través del servicio web RESTful [31].

A continuación se presentará el proyecto de REDCap diseñado y su comunicación con MATLAB. Además, se detallará el resultado final de la aplicación de escritorio *TUSTOOL* desarrollada a partir de los requisitos funcionales expuestos.

3.2.1. Comunicación con REDCap

El fundamento de la aplicación *TUSTOOL* es la comunicación con la base de datos REDCap. Dicha comunicación permitirá a los especialistas el seguimiento de sus alumnos durante el proceso formativo y permitirá también que el repositorio de casos disponibles para los alumnos crezca progresivamente. Dicha comunicación se consigue mediante dos acciones: exportar e importar *records* a REDCap mediante llamadas de tipo POST a la API.

Antes de comenzar a utilizar la API de REDCap, es necesario obtener un *TOKEN* desde la opción “API” de REDCap, el cual permitirá el acceso únicamente a los datos del proyecto “**Radioterapia segmentación**”. Además, para ambas vías de comunicación (importación y exportación) hace falta configurar unos parámetros obligatorios y opcionales, tal y como se especifica en la documentación de la API de REDCap [24].

- **Exportar records:** Esta operación se realiza cuando la aplicación necesita acceder a información de REDCap para mostrarla en la interfaz. REDCap solicita tres campos concretos: *record* con el id del registro que se quiere recuperar; *forms* con el nombre del instrumento; *fields* con los campos que se piden.

Esta operación se ha implementado mediante la función *exportar(tabla, ID)* que toma como parámetros de entrada el nombre de la **tabla** de la que se quieren obtener los datos y, opcionalmente, el **ID** del registro (ID del alumno, del especialista o del caso) que se deseé exportar.

- **Importar records:** Esta operación se realiza cuando se generan nuevos datos tras usar la aplicación, por ejemplo, al crear un nuevo caso o al registrar un nuevo alumno. Para

ello, hay que indicar en el parámetro *data* todos los datos que se quieren incluir, siendo obligatorio el *record_id*.

Esta operación se ha implementado con la función *importar(datos)* que, a su vez es llamada por las siguientes funciones:

- *importar_alumnos()*
- *importar_especialistas()*
- *importar_casos()*
- *importar_resultados()*.

Donde, los parámetros de entrada serán los valores de los campos de las tablas **ALUMNOS**, **ESPECIALISTAS**, **CASOS** y **RESULTADOS** respectivamente. Además, en los tres casos hay un último parámetro de entrada que siempre toma el valor “2” e indica a REDCap que el registro está completo. Estas funciones crean un JSON a partir de los parámetros de entrada y, a su vez, lo introducen como entrada de la función *importar(datos)* mencionada anteriormente.

Ambas operaciones (*exportar(tabla, ID)* e *importar(datos)*) recurren a la función *webwrite(server_url,data,options)* de Matlab que manda consultas a través del servicio web RESTful [31]. A continuación se muestra el código de la función *exportar(tabla, ID)*.

```
function response = exportar(tabla, ID)
% Función para exportar tablas de REDCap
if nargin == 2
    id = strcat("&records[0]=",string(ID));
else
    id = "";
end
p1 = strcat("token=C1982152F795F902FE7DAFDAA81E52BC&content=record&...",
            "format=json&type=flat&csvDelimiter=");
p2 = strcat("&rawOrLabel=raw&rawOrLabelHeaders=raw&exportCheckboxLabel",
            "=false&exportSurveyFields=false&exportDataAccessGroups=",
            "false&returnFormat=json");
data = strcat(p1,id,"&forms[0]=",tabla,p2);
options = weboptions('RequestMethod','POST','MediaType',...
                     'application/x-www-form-urlencoded','keyName',...
                     'Accept: application/json','Timeout',10);
server_url = "https://bioinfo.irycis.org/redcap/api/";
response = webwrite(server_url,data,options);
end
```

Figura 21: Función para exportar registros.

Como respuesta, en el caso de las exportaciones la función devuelve una variable de tipo *struct* con los datos de la tabla o del registro que se han recuperado de REDCap. Por su parte, al almacenar datos, la función *importar(datos)* devuelve una variable (“count”) con valor “1” si se ha guardado el registro adecuadamente o “0” si no se ha guardado.

A la hora de importar alumnos, especialistas o casos, es necesario que se compruebe previamente que no existe ningún registro con el mismo valor para la *PRIMARY_KEY* y, una vez se

comprueba y se guardan los datos, se debe asegurar que el registro se ha guardado adecuadamente en la base de datos. No obstante, como se describe en el apartado 3.1.1, en el caso de querer almacenar datos en la tabla de **RESULTADOS** no hará falta realizar esa comprobación ya que, de acuerdo con los requisitos expuestos en el apartado 2.1.2 nunca será posible segmentar un caso dos veces el mismo día.

3.2.2. Aplicación MATLAB

A continuación se dará una explicación más técnica de la creación de la herramienta *TUSTOOL*. Como se ha explicado en el apartado 2.2, esta aplicación cuenta con distintas interfaces en función del rol que tenga el usuario. En total, se han implementado 10 interfaces: Una pantalla inicial; una interfaz para el registro de residentes; otra para el inicio de sesión; un menú principal con las opciones del usuario (uno distinto en función del rol); dos interfaces para la segmentación de casos; una pantalla para la creación de casos; otra para la visualización de resultados; un panel de configuración del perfil de usuario. En esta sección se verá el código que da funcionalidad a cada una de ellas.

3.2.2.1. Algoritmos de cálculo de métricas

Es necesario definir una serie de criterios de evaluación del acuerdo entre las estructuras segmentadas por el alumno y sus correspondientes *gold standards*. En esta sección se especifican las métricas elegidas para el cálculo de las calificaciones asociadas al desempeño del alumno.

Las métricas propuestas se basan en parámetros estadísticos que, a su vez, se calculan a partir de parámetros geométricos.

■ Parámetros geométricos. Métricas basadas en áreas

CERR proporciona una función que permite obtener las máscaras binarias de las estructuras segmentadas. A partir de estas máscaras, se hallan las máscaras intersección y unión mediante operaciones lógicas: la intersección se corresponde con la operación AND, mientras que la unión corresponde al OR.

■ Parámetros estadísticos

Existen numerosas métricas de evaluación de la variabilidad entre observadores en estudios de planificación de radioterapia. La elección de las métricas empleadas en este proyecto se ha basado en dos criterios fundamentales:

1. En el caso de los tratamientos de radioterapia, irradiar en exceso puede resultar en un aumento de efectos secundarios mientras que irradiar en defecto reduce la eficacia del tratamiento. Dado que ambas situaciones llevan repercusiones graves en la salud del paciente, será necesario considerar y penalizar de la misma forma la supraestimación y la infraestimación de la lesión y de los órganos adyacentes [32].

2. En este proyecto se considera que las estructuras segmentadas por el especialista son las lesiones reales, por lo que la comparación tomará estas estructuras como referencias.

Así mismo, el cálculo de los índices seleccionados se basa en la información contenida en la llamada "Matriz de confusión".

La matriz de confusión es el instrumento más usual para evaluar la exactitud de una clasificación [33]. Dicha matriz muestra la relación entre dos series de medidas correspondientes al área en estudio. Las columnas corresponden a los datos de referencia mientras que las filas corresponden a la segmentación realizada por el alumno. A partir de la matriz de confusión pueden deducirse varios índices relativos a la exactitud de la clasificación (Figura 22).

Matriz de confusión		Estimado por el modelo				
		Negativo (N)	Positivo (P)			
Real	Negativo	a: (TN)	b: (FP)	Precisión ("precision") Porcentaje predicciones positivas correctas:	$d/(b+d)$	
	Positivo	c: (FN)	d: (TP)			
		Sensibilidad, exhaustividad ("Recall") Porcentaje casos positivos detectados	Especificidad (Specificity) Porcentaje casos negativos detectados	Exactitud ("accuracy") Porcentaje de predicciones correctas <i>(No sirve en datasets poco equilibrados)</i>		
		$d/(d+c)$	$a/(a+b)$	$(a+d)/(a+b+c+d)$		

Figura 22: *Matriz de confusión*.

Donde, para el caso en cuestión:

- Los **verdaderos positivos** son los píxeles clasificados correctamente por el alumno como pertenecientes a la estructura segmentada (Intersección).
- Los **verdaderos negativos** son los píxeles que el alumno clasifica correctamente como "fondo".
- Los **falsos positivos** son los píxeles que el alumno ha incluido erróneamente como parte de la estructura segmentada.
- Los **falsos negativos** son los píxeles que, siendo parte de la estructura a segmentar, el alumno ha dejado fuera del contorno.

De acuerdo con los criterios definidos, se han elegido cuatro parámetros estadísticos que se calcularán a partir de los datos recogidos en la matriz de confusión.

• Coeficiente Cohen's Kappa

El coeficiente Kappa es una medida estadística de la fiabilidad entre observadores. Se considera una medida más robusta que el simple cálculo del porcentaje de acuerdo ya que Kappa tiene en cuenta también el acuerdo que ocurre por casualidad. Se trata de una métrica que ha sido ampliamente utilizada en estudios de análisis del acuerdo entre observadores en planificación de radioterapia [2][34][35].

El resultado de este coeficiente es función de los datos presentados en la matriz de confusión (Figura 24).

$$OA \text{ (Observed Agreement)} = \frac{a + d}{i}$$

$$AC \text{ (Agreement of Chance)} = \frac{e + f + g + h}{i}$$

$$Kappa = \frac{OA - AC}{1 - AC}$$

Matriz de confusión		Estimado por el alumno		
		Negativo	Positivo	
REAL	Negativo	a: (VN)	b: (FP)	g: (a+b)
	Positivo	c: (FN)	d: (VP)	h: (c+d)
		e: (a+c)	f: (b+d)	i: (g+h)

Figura 24: *Cálculo de Kappa.*

A la hora de interpretar este parámetro, se sigue una escala definida por Landis y Koch [36], en la cual los valores más próximos a 1 se corresponden con la máxima concordancia y los más cercanos a 0 con la mínima (Figura 25).

Valor de Kappa	Interpretación
<0.00	Sin Acuerdo
0.01-0.20	Insignificante
0.21-0.40	Discreto
0.41-0.60	Moderado
0.61-0.80	Sustancial
0.81-1.00	Casi Perfecto

Figura 25: *Interpretación del resultado de Kappa.*

• Coeficiente de Sørensen-Dice

Normaliza el volumen de intersección entre dos estructuras para proporcionar un valor comprendido entre 0 (no hay superposición) y 1 (Perfecta coincidencia) [4]. Se trata de la métrica más empleada en la literatura de este tema por lo que era imprescindible considerarla para el cálculo de la calificación [37]. Nuevamente, este parámetro se obtiene a partir de la matriz de confusión (Figura 22).

$$\frac{2TP}{2TP + FP + FN}$$

Figura 26: *Coeficiente de Sørensen-Dice (DSC).*

• Índice Jaccard o *Intersection over Union (IoU)*

Es muy similar al Coeficiente de Sørensen-Dice, ambos están correlacionados positivamente. El rango de valores que puede tomar es el mismo que el del coeficiente DSC. Como se puede observar, la única diferencia aparente entre las fórmulas de los índices IoU y DSC es que DSC da más peso a los verdaderos positivos (TP) (Figura 26 y 77).

$$\frac{TP}{TP + FP + FN}$$

Figura 27: *Coeficiente IoU.*

• Similitud

La similitud es una función de la precisión y la sensibilidad ('p' y 's' respectivamente).

$$\text{Precisión} = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$\text{Sensibilidad} = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$\text{Similitud} = 1 - \frac{\sqrt{(1-p)^2 + (1-s)^2}}{\sqrt{2}}$$

Figura 29: *Cálculo de la similitud.*

El criterio que se va a establecer para definir la similitud en el contexto de este proyecto es considerar igual de importantes la precisión (sobresegmentación) y la sensibilidad(subsegmentación) como se ha explicado previamente.

3.2.2.2. Creación de la interfaz de segmentación

La interfaz de segmentación se creó partiendo del código original de CERR, modificando tres funciones principales para adaptar tanto la interfaz gráfica como las funcionalidades disponibles.

- ***sliceCallBack()*** Es la función principal de CERR. Se encarga de crear y actualizar la herramienta de visualización de imágenes que es llamada por *CERRSlice Viewer*. Cabe destacar que esta función hace uso de dos variables globales importantes de tipo *Cell array*:

- ***planC***: Almacena toda la información relativa al caso que se va a segmentar, incluida la información de las segmentaciones anatómicas.
- ***stateS***: Contiene la información correspondiente al estado de las operaciones que se llevan a cabo durante la utilización de la herramienta (herramientas seleccionadas, corte que se está visualizando, etc).

sliceCallBack() va a ser la encargada de crear dichas variables globales e ir modificando sus campos. Para inicializar la interfaz, se llama a esta función con tres parámetros de entrada distintos:

- *sliceCallBack('INIT')* (Figura 30)

Se encarga de inicializar los valores de los campos de las variables *planC* y *stateS*, así como de añadir todos los componentes gráficos de la interfaz.

Para el desarrollo de esta aplicación, se eliminó el *menubar* de la interfaz con las opciones de importar archivos, crear dosis, manipular las estructuras del caso, las métricas, la visualización, el escáner etc. Así mismo, se creó una tercera variable global denominada *ref* con la misma estructura que *planC*.

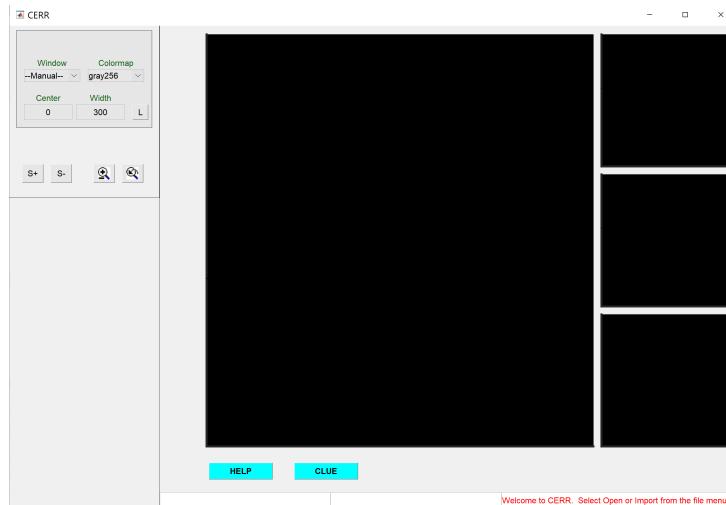


Figura 30: *sliceCallBack('INIT')*

- *sliceCallBack('OPENNEWPLANC', etc)* (Figura 31)

Esta función carga la información de un caso y la muestra en los distintos visores. Para este caso, además, se han añadido una serie de parámetros de entrada correspondientes a la información del alumno y del caso seleccionado:

- Nombre del archivo que se va a cargar.
- ID del alumno.
- Nombre del caso.
- Modalidad de imagen.
- Módulo al que pertenece.
- La realimentación que el especialista añadió a ese caso.

De esta forma, se rellena la variable *planC* con la información del caso y se añaden los datos introducidos como parámetros de entrada en nuevos campos de *planC{1,1}*.

Así mismo, esta función rellena los campos de la variable *ref* con el mismo contenido que la variable *planC* y elimina de esta última la información relativa a las estructuras de referencia (manteniendo un campo llamado *structNames* con únicamente los nombres de estas también en *planC{1,1}*).

De esta manera se consigue que haya dos variables diferenciadas que contengan la información de las nuevas estructuras y de las estructuras de referencia respectivamente, lo cual facilitará el trabajo a la hora de calcular las métricas de comparación entre estructuras.

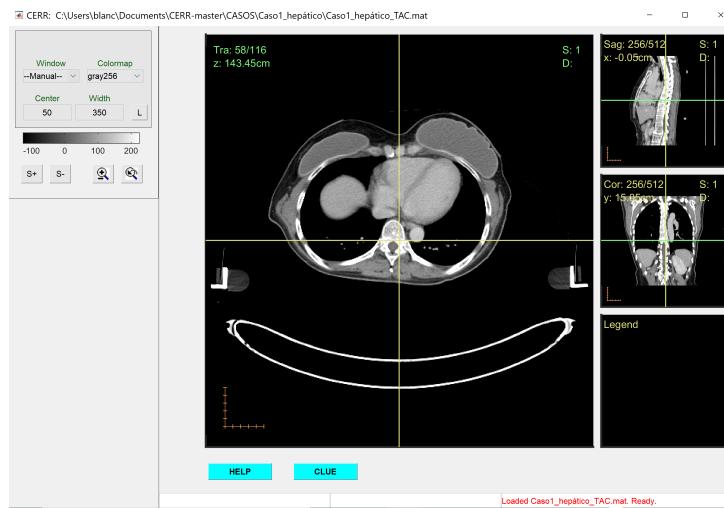


Figura 31: *sliceCallBack('OPENNEWPLANC', etc)*

- *sliceCallBack('CONTOURMODE')* (Figura 32)

Finalmente, esta función hace uso de las funciones *controlFrame()* y *contourControl()* para añadir las herramientas de contorneo.

Para la implementación de *TUSTOOL* se han modificado las opciones y herramientas disponibles. Los principales cambios han sido:

- La creación de un desplegable con las estructuras de referencia del caso.
- Los botones de **Copy +Z** y **Copy -Z**.
- La opción para modificar el radio de la herramienta *brush*.
- El botón de acceso al manual de usuario *Help*.
- El botón *Clue* con pistas que ayuden al alumno a contornear las estructuras del caso.
- El botón *Finish* que calcula las métricas y la calificación obtenidas de la comparación con los *Gold Standards* y almacena los resultados en la base de datos REDCap.

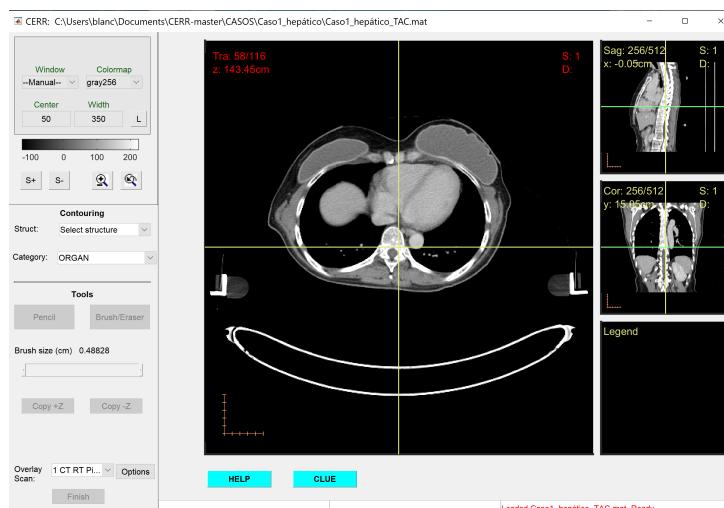


Figura 32: *sliceCallBack('CONTOURMODE')*

- *controlFrame()* y *contourControl()*

Son funciones que se encargan del diseño de las herramientas de contorneo y de la funcionalidad de cada una respectivamente.

Una vez abierta la interfaz, el usuario puede comenzar a segmentar haciendo uso de las distintas herramientas disponibles:

- **Modificación del contraste**

El usuario puede modificar el contraste de las imágenes de dos formas distintas: cambiando los valores del nivel y la ventana del panel superior izquierdo o bien seleccionando el botón "L" del mismo panel y haciendo click sobre la imagen y arrastrando el ratón hacia arriba o hacia abajo (Figura 33).

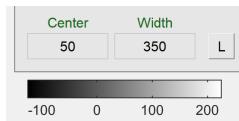


Figura 33: *Cambio de contraste.*

- **Zoom**

Para asegurar una correcta delimitación de las estructuras, el usuario puede hacer o deshacer zoom sobre la imagen empleando los correspondientes botones del panel superior izquierdo (Figura 34).



Figura 34: *Herramienta de zoom.*

- **Moverse por los cortes**

Para moverse por los distintos cortes, el usuario puede emplear los botones **S+** y **S-** del panel superior izquierdo (Figura 35) o bien hacer *scroll* sobre la imagen. En la esquina superior izquierda de las imágenes se puede ver el tipo de vista (Tra, Sag y Cor) así como el número del corte que se está mostrando.



Figura 35: *Cambiar de slice.*

- **Seleccionar estructura**

Las herramientas de segmentación permanecerán deshabilitadas hasta que el usuario seleccione una estructura para segmentar desde el panel de la izquierda (Figura 36).

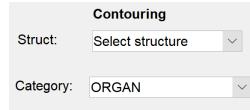


Figura 36: Selección de estructura.

La interfaz de contorneo original de CERR permitía al usuario crear nuevas estructuras mientras que, en este caso, el usuario debe seleccionar la estructura que quiere segmentar de las opciones que aparecen en un desplegable. Dichas opciones serán las estructuras de referencia disponibles para el caso médico en cuestión. Para hacerlo, se ha modificado la función `controlFrame('CONTOUR','REFRESH')` de forma que al abrir la interfaz, se crea un *struct* de celdas llamado *numberedStructs* que contendrá los nombres de las estructuras de referencia que se habían guardado previamente en el campo *structNames* en `planC{1,1}`. Con dicha lista enumerada, se poblará el desplegable de la interfaz de la figura 36.

```
% Get names of referencial structures
numStructs_ref = size(planC{1,1}.structNames,2);
structs_ref = planC{1,1}.structNames;
for i = 1:numStructs_ref
    numberedStructs{i} = "Select structure";
    numberedStructs{i+1} = [num2str(i) ' .' structs_ref{i}];
end
```

Figura 37: Lista de estructuras.

```
set(ud.handles.structPopup, 'string', numberedStructs, 'enable', 'on', 'userdata', strUd);
```

Figura 38: Creación del desplegable.

Al seleccionar una estructura del desplegable, se llama a la función `contourFrame('CONTOUR','NEW')` que se ha implementado para que realice una serie de tareas:

- Habilitar las herramientas de contorneo y el botón finish.
- Comprobar si existía ya una fila con ese nombre (para evitar que se dupliquen filas si el alumno selecciona dos veces la misma opción del desplegable). Si ya estaba creada, se continuará trabajando con esa fila.

```
% We increment toAdd only when the selected structure
% hasn't been already selected (is stored in planC)
exists = false;
structNum = get(ud.handles.structPopup, 'value') - 1;
structName = planC{1,1}.structNames(structNum);
nStructs = length(planC{indexS.structures});
toAdd = 1;
for i = 1:nStructs
    if strcmp(planC{indexS.structures}(i).structureName, structName)
        exists = true;
        toAdd = i;
    end
end
```

Figura 39: Se comprueba si la estructura existe.

- Crear una nueva fila en $planC\{1,4\}$ con el nombre de la estructura seleccionada en el campo *structureName* o continuar rellenando los campos de la fila asociada a la estructura seleccionada.

```
%Insert the new structure at the end of the list.
newStr = newCERRStructure(scanNum);
newStr.associatedScan = scanNum;
newStr.strUID = createUID('structure');
newStr.assocScanUID = planC{indexS.scan}(scanNum).scanUID;
newStr.structureName = planC{1,1}.structNames(structNum);
% We create a new structure only if it doesn't exist
% already.
if ~exists
    toAdd = nStructs + 1;
    planC{indexS.structures} = dissimilarInsert(planC{indexS.structures}, newStr, toAdd);
end
end
```

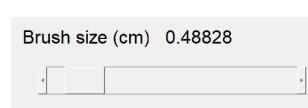
Figura 40: Se crea o se continua con la estructura seleccionada.

• *Pencil y brush*

Una vez seleccionada la estructura, el usuario puede comenzar a contornear sobre las imágenes con líneas simples utilizando el *Pencil* o con esferas, mediante la herramienta *Brush* (Figura 41a) y la barra de selección de radio (Figura 41b) que está asociada a la función *controlFrame('CONTOUR','SETBRUSHSIZE')* de CERR.



(a) Herramientas de contorno.



(b) Selección de radio del brush.

Figura 41: *Pencil y brush*.

• *Copy +Z y Copy -Z*

Con el objetivo de agilizar el contorneo de las estructuras, el usuario puede copiar y pegar los contornos de un corte a otro adyacente mediante los botones *Copy +Z* y *Copy -Z* del panel de la izquierda (Figura 42). Esta funcionalidad está implemen-

tada mediante las funciones de CERR *contourControl('COPYINF')* Y *contourControl('COPYSUP')* para copiar y pegar las estructuras del corte actual en un corte superior o inferior.

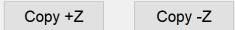


Figura 42: *Copiar y pegar contornos.*

- ***Help***

En caso de dudas sobre el funcionamiento de la interfaz, el usuario puede acceder a un manual de instrucciones seleccionando la opción "*Help*" (Apartado 1.6. del manual de usuario del Anexo II).

- ***Clue***

En REDCap se almacena, para cada caso, información clave añadida por el especialista sobre las estructuras a segmentar. De esta forma, si el alumno encuentra dificultades con alguna estructura, podrá consultar esta información mediante la opción "*Clue*". La figura 43 muestra un ejemplo de pista.

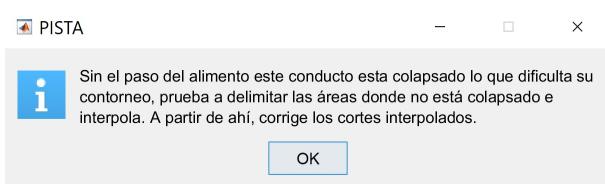


Figura 43: *Ejemplo de pista para la segmentación del esófago.*

Una vez el alumno ha terminado de segmentar todas las estructuras, deberá pulsar la opción ***Finish***. Al hacerlo, y para evitar posibles errores, el sistema muestra el siguiente mensaje por pantalla:

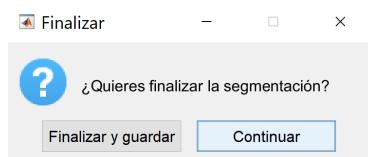


Figura 44: *Finalizar segmentación.*

Al seleccionar "Finalizar y guardar", el programa realiza una serie de acciones:

1. Guarda la información de cada estructura segmentada en la variable *planC* mediante la función de CERR *contourControl('SAVE')*.
2. Se eliminan las filas de *planC{1,4}* que no tienen trazos, es decir, aquellas en las que el campo *rasterSegment* está vacío.
3. Se llama a la función *comparation()* que se encarga de **comparar cada estructura segmentada con su gold standard** almacenado en la variable *ref*. Esta función irá

recorriendo las estructuras contorneadas por el alumno y, para cada una de ellas obtienen, en primer lugar, las máscaras de las estructuras segmentadas y las de referencia a partir del campo *rasterSegments* (mediante la función de CERR *rasterToMask()*). A continuación, se obtienen las máscaras de intersección y unión mediante las operaciones lógicas *AND* y *OR* respectivamente y, con ellas, se calculan los parámetros estadísticos definidos en el apartado 3.2.2. El anexo III contiene las líneas de código que implementan el cálculo de estos parámetros.

4. A continuación, para cada estructura, **se genera un nuevo registro** en la tabla “RESULTADOS” de la base de datos con todas métricas calculadas, así como los datos del ID del alumno, el nombre del caso, el módulo, la modalidad, el nombre de la estructura y la fecha. Todo este proceso conlleva un tiempo de ejecución que dependerá del número de estructuras segmentadas. El usuario podrá ir viendo la evolución de los cálculos realizados mediante barras de progreso.



Figura 45: *Barra de estado.*

5. Para cada estructura segmentada, se carga su estructura de referencia en la variable *planC*.
6. Finalmente, se llama a la función *sliceCallBack('RESULTSMODE')* la cual va a modificar la interfaz para mostrar las estructuras y los resultados.

Esta interfaz está implementada con tres funciones principales:

- 6.1 *contourFrame('RESULTS','INIT')*: Inicializa la nueva interfaz, con todos los elementos que la componen: un desplegable con las estructuras segmentadas, los resultados de las métricas y el botón con la explicación de las métricas. Además, se mantienen todos los componentes de la interfaz anterior excepto las herramientas propiamente de contorno.
- 6.2 *contourFrame('RESULTS','REFRESH')*: Rellena el desplegable con los nombres de las estructuras que ha segmentado el alumno.
- 6.3 *contourFrame('RESULTS','SELECTSTRUCT')*: Al seleccionar una estructura del desplegable, se llama a esta función, con lo que se hacen visibles la estructura y su *gold standard* en los tres visores y también se hacen visibles los resultados de las métricas y la calificación en el panel de la izquierda.

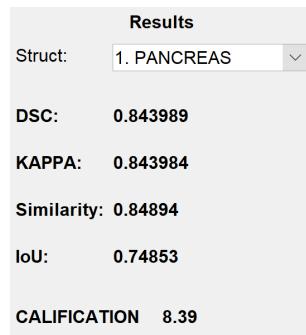


Figura 46: *Ejemplo de resultados de las métricas.*

En la interfaz de resultados, el botón “*Metrics*” (Figura 48) proporciona información detallada sobre el cálculo de cada una de las métricas de comparación (Figura) así como la fórmula empleada para hallar la calificación final de cada estructura segmentada (Figura 47).

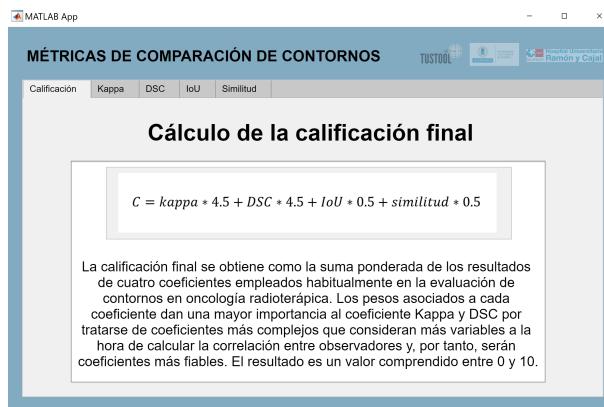
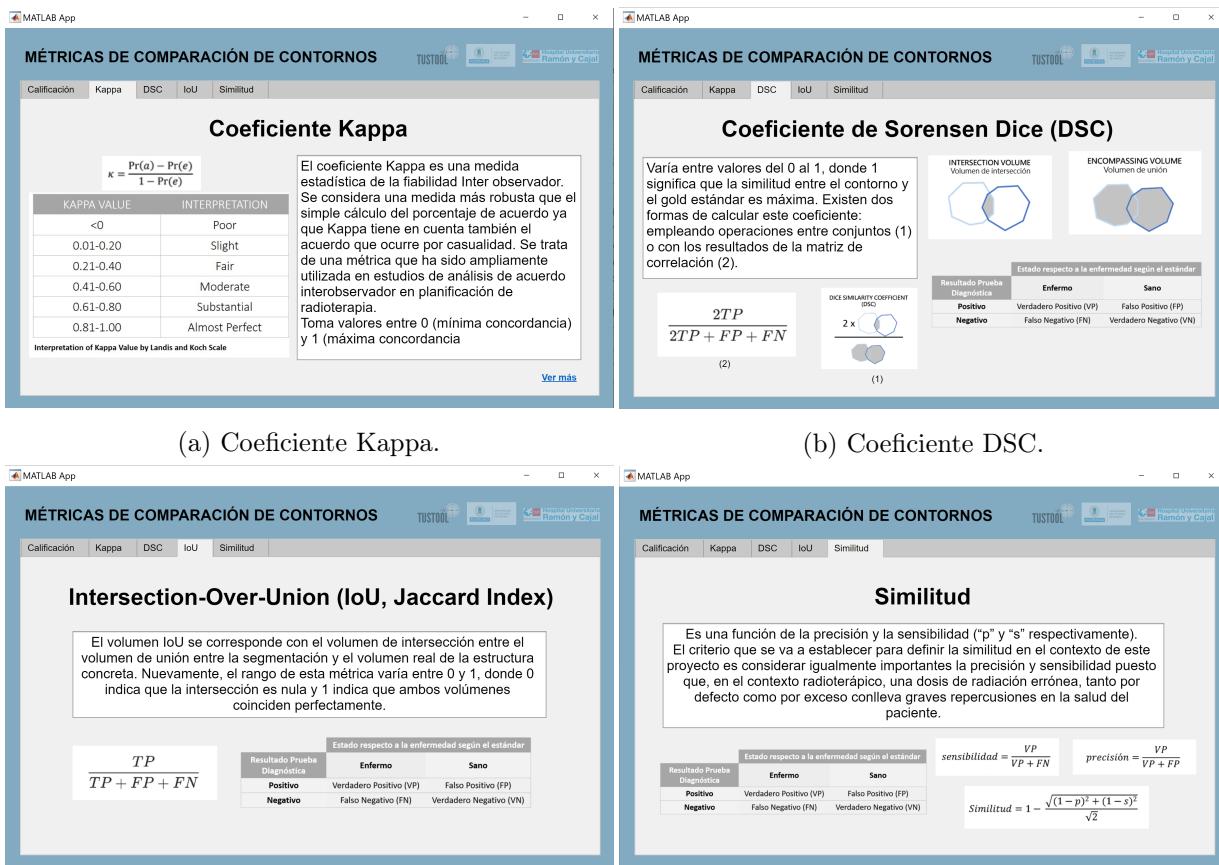
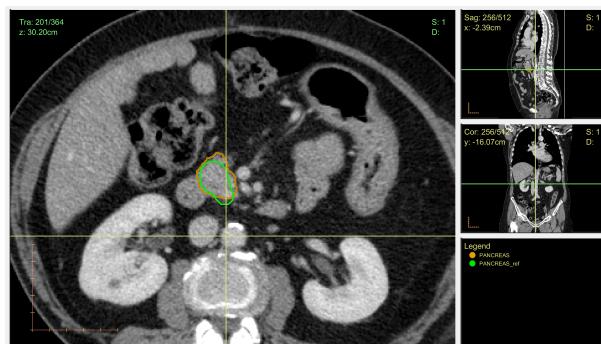


Figura 47: *Cálculo de la calificación*

Figura 48: *Métricas de comparación.*

Las estructuras realizadas por el alumno siempre aparecerán en color naranja mientras que las de referencia serán verdes. Además, el panel inferior derecho con el nombre **Legend** mostrará el nombre de la estructura que se está visualizando y el de la estructura de referencia (que siempre tendrá la forma **nombre_estructura + "_ref"**) (Figura 49).

Figura 49: *Visualizar estructuras.*

Además, el usuario podrá seleccionar la vista que quiere ver en el visor principal haciendo doble click sobre ella (Figura 50).



Figura 50: *Cambiar de vista.*

Para terminar, el alumno deberá cerrar la interfaz de segmentación, con lo que el sistema le preguntará si desea seguir segmentando casos o volver al menú principal (Figura 51).

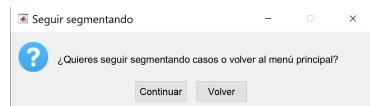


Figura 51: *Seguir segmentando.*

3.2.2.3. Aplicación: *TUSTOOL*

El nombre de la aplicación hace referencia a las siglas de ***TU*mor *S*egmentation *T*raining *T*ool** que define la funcionalidad principal de la plataforma. También se ha diseñado un logo para caracterizar la aplicación (Figura 52).



Figura 52: *Logo de la aplicación TUSTOOL.*

La aplicación cuenta con numerosas interfaces correspondientes a las distintas funcionalidades de la herramienta. Cada interfaz se ha desarrollado con *auto reflow* de forma que tanto las dimensiones de los paneles como del resto de los elementos, se adapten dinámicamente a las dimensiones de la pantalla del dispositivo donde se emplea. Se irán abriendo y cerrando distintas interfaces en función de las opciones que vaya seleccionando el usuario. Con el objetivo de hacer que la herramienta sea intuitiva y fácil de usar, los elementos de cada interfaz se van habilitando

y deshabilitando progresivamente para guiar al usuario hacia el siguiente paso. En caso de duda, se proporcionan *hints* y guías de ayuda que dan al usuario información adicional sobre el uso de la aplicación.

Por otro lado, para el control de errores se han implementado mensajes de alerta y cuadros de diálogo con mensajes explicativos del error ocurrido, advertencias o consultas.

1. Pantalla inicial

La página principal ofrece una breve introducción sobre la herramienta y ofrece al usuario la posibilidad de iniciar sesión o de registrarse como un nuevo usuario (Figura 53).



Figura 53: *Pantalla inicial*.

2. Registro e inicio de sesión

Si el usuario decide iniciar sesión, debe introducir sus credenciales para acceder al menú principal (Figura 54a).

En el caso de que sea la primera vez que un alumno utiliza la aplicación, este deberá introducir sus datos personales para registrarse (Figura 54b).

(a) *Inicio de sesión*.

(b) *Registro*.

Figura 54: *Registro e inicio de sesión*

El sistema muestra un mensaje de alerta que informa al usuario del problema ocurrido en las siguientes situaciones:

- En caso de que el usuario no rellene alguno de los campos obligatorios.

- Si trata de iniciar sesión con credenciales incorrectas.
- Si alguno de los campos introducidos no sigue el formato adecuado.
- Si no existe el usuario que intenta iniciar sesión.
- Si ya existe el usuario que se está registrando.

En el caso de **inicio de sesión**, el sistema accede a REDCap y comprueba que existe el usuario.

En el caso de **registro**, el sistema comprueba que no existe un usuario con el mismo correo electrónico y, en caso de que no exista, crea un nuevo registro en la tabla **ALUMNOS**.

Finalmente, el usuario accede al menú principal de la herramienta.

3. Menú principal

El menú principal de la aplicación varía en función de si el usuario es un residente o un especialista.

Si el usuario es un **residente** encontrará dos opciones principales: Segmentar casos o visualizar los resultados (Figura 55a). Así mismo, el alumno tiene la opción de modificar sus datos personales desde el ícono del perfil de la esquina superior izquierda.

Si, por el contrario, el usuario es un **médico especialista**, la interfaz mostrará una opción de crear nuevos casos y otra de visualizar los resultados(Figura 55b). En este caso, el usuario tendrá que seleccionar el alumno del que quiere conocer los resultados.

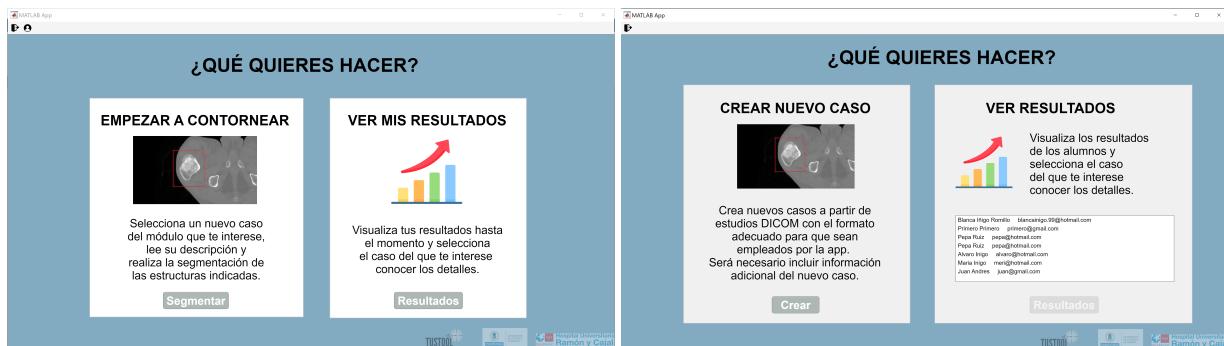


Figura 55: Menú principal

4. Creación de casos

Una de las funcionalidades disponibles para los especialistas es la creación de nuevos casos médicos. Desde la interfaz responsable de esta función, el especialista debe seleccionar la carpeta con el caso en cuestión. Es importante que la carpeta tenga una estructura de ficheros concreta que el usuario puede conocer haciendo click en el ícono de información (Figura 59a). La función encargada de pedir en directorio de la carpeta y de identificar las modalidades que incluye es *import_folder()*.

A continuación, el sistema ejecuta una serie de funciones que convierten el documento en ficheros *.mat* (tantos como modalidades tenga el caso). Para hacer esta conversión se ha creado una función llamada *CERRImportDCM_Blanca()* a partir de la función de CERR *CERRImportDCM()* que se llamará tantas veces como modalidades tenga el caso y guardará temporalmente cada fichero en el directorio de CERR. Este proceso puede llevar varios minutos en función del número de modalidades que se estén convirtiendo. El usuario será informado del progreso de la operación mediante barras de estado.

A continuación, se carga el fichero creado, se recuperan las estructuras de referencia que contiene y se cargan en el panel central para que el especialista seleccione solo las que quiera que los alumnos segmenten.

Una vez se han convertido los archivos, se habilitan el resto de botones y cuadros de texto de la interfaz. En este momento, el especialista tendrá que completar los datos asociados al nuevo caso (Nombre del caso, nivel de dificultad, módulo al que pertenece, estructuras a segmentar, descripción del caso y realimentación) (Figura 59b). Nuevamente, los iconos de información ayudarán al alumno en caso de duda (Figura 56).

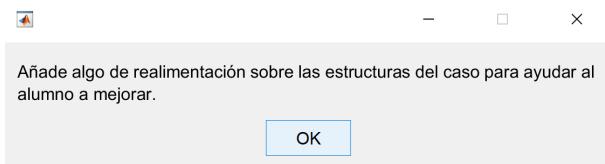


Figura 56: *Mensajes de ayuda*.

Por último, el usuario debe seleccionar el botón “**Crear**” con lo que se comprueba que todos los campos obligatorios estén completos y que no exista ya un caso con ese nombre en la base de datos. Si se cumplen ambas condiciones, se le pide al usuario un directorio en el que guardar el archivo generado. A continuación se crea una carpeta en dicho directorio con el nombre que el especialista le haya dado al caso. Antes de guardar los ficheros en la carpeta creada, se eliminan las estructuras que el especialista no ha seleccionado (Ver figura 57).

```

if app.EstructurasLabel_PET.Enable
    modalidades_caso_1 = 1;
    load NuevoPET.mat
    estructuras = planC{1,4};
    n = size(estructuras,2);
    estructuras_selec = app.EstructSelc_PET.Items;
    m = size(estructuras_selec,2);
    k = 1;
    for i=1:n
        % Se recorren las estructuras y se mantienen solo las
        % que se hayan seleccionado.
        nombre_struc = estructuras(i).structureName;
        for j=1:m
            nombre_selec = estructuras_selec{j};
            if strcmp(nombre_struc,nombre_selec)
                nuevas_structs(k) = estructuras(i);
                k = k+1;
            end
        end
    end
    % Se cargan las estructuras disponibles en el archivo
    planC{1,4} = nuevas_structs;

```

Figura 57: *Se eliminan las estructuras no seleccionadas en un estudio PET.*

Después, se guardan las nuevas variables *planC* en el directorio proporcionado y se eliminan los archivos que se habían guardado temporalmente en el directorio de CERR (Figura 58). Finalmente, se almacena toda la información del nuevo caso en la tabla correspondiente del proyecto de REDCap.

```

% Se guarda la nueva variable en un nuevo archivo.
save(strcat(final_path,'\',caso,'_PET'),"planC");
% Se elimina el fichero auxiliar.
delete(strcat(CERRPath,'NuevoPET.mat'));

```

Figura 58: *Se guarda el nuevo fichero y se elimina el temporal.*

Cabe destacar que, dado que los ficheros *.mat* de los estudios se almacenan localmente, cada vez que un especialista cree un nuevo caso, deberá compartir el fichero generado con sus alumnos para que estos puedan segmentar sus estructuras.

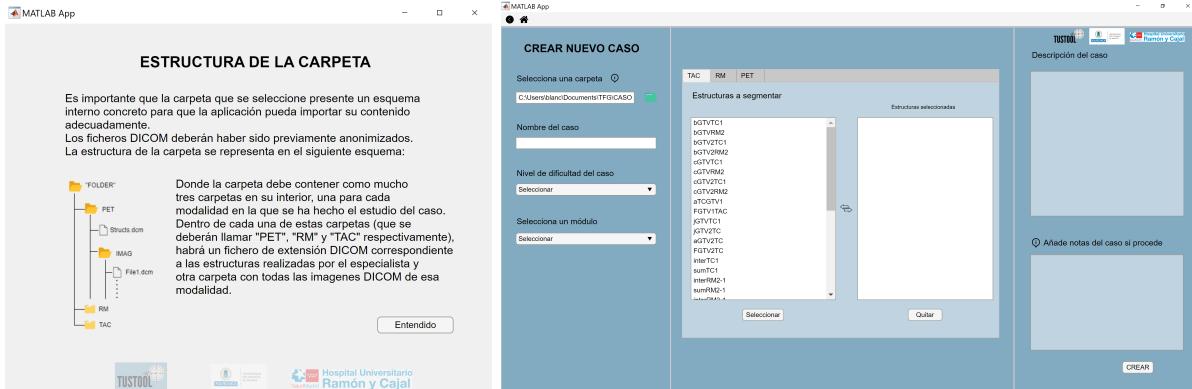


Figura 59: *Crear nuevos casos.*

5. Segmentación de casos

La funcionalidad principal de la aplicación y con la implementación más compleja es la segmentación de estructuras. Esta herramienta consta de dos interfaces: una interfaz de selección del caso a segmentar y la interfaz de segmentación en sí.

Cuando el usuario accede a la opción de “**Empezar a contornear**” del menú principal, se abre una nueva pestaña desde la que el alumno irá aplicando filtros hasta seleccionar el caso que desea contornear:

- 5.1 **Selección del módulo:** Tal y como se ha definido en el apartado 3.1.1, el listado de módulos que se mostrará al alumno dependerá de su año de residencia que, a su vez dependerá del año de inicio y del mes y año actual (los cursos comienzan en Mayo). Una vez seleccionado el módulo, se habilita el selector del nivel de dificultad.
- 5.2 **Selección del nivel de dificultad:** Cada módulo incluye casos que han sido clasificados en función de su grado de dificultad por el especialista que lo haya importado en *TUSTOOL*. Por consiguiente, el alumno deberá filtrar los casos del módulo seleccionado en función de si quiere aquellos de nivel **básico**, **medio** o **elevado**.
- 5.3 **Selector del caso:** A continuación, se habilita un desplegable con todos los casos que cumplen con los criterios de pertenencia al módulo y al nivel de dificultad establecidos.
- 5.4 **Información del caso:** El usuario podrá modificar cualquiera de sus elecciones, con lo que se actualizarán las opciones disponibles en los desplegables inferiores. Cuando se hayan elegido las tres opciones, el usuario debe hacer click en el botón de “**ver caso**”, con lo que se mostrará la descripción del caso y se cargan las modalidades disponibles en el panel de la derecha de la figura 60.



Figura 60: *Selección de caso a segmentar*.

- 5.5 **Comenzar a segmentar:** Por último, se selecciona el botón de “**Segmentar**”. En este momento, se comprueba si el alumno ha trabajado con este caso en las últimas 24 horas. Si lo ha hecho, aparece un mensaje por pantalla informándole de que debe seleccionar otro caso u otra modalidad del mismo caso que no haya segmentado ese día o esperar 24 horas a que se habilite. Este requisito pretende evitar que el alumno memorice la solución de un caso y lo repita. Tras esta comprobación, se le pide al

usuario que seleccione la carpeta en la que tiene almacenados los casos. Es importante que la carpeta seleccionada tenga una estructura interna concreta tal y como se muestra en la figura 61.

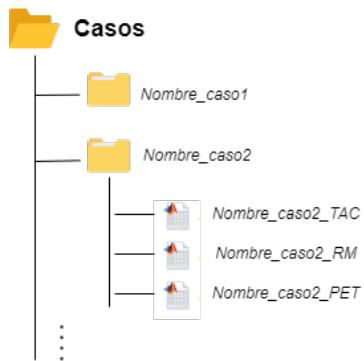


Figura 61: *Estructura de la carpeta de casos.*

A continuación, se recupera el archivo del caso si existe dentro de la carpeta seleccionada y se abre la interfaz de segmentación, cargando dicho archivo (Figura 62).

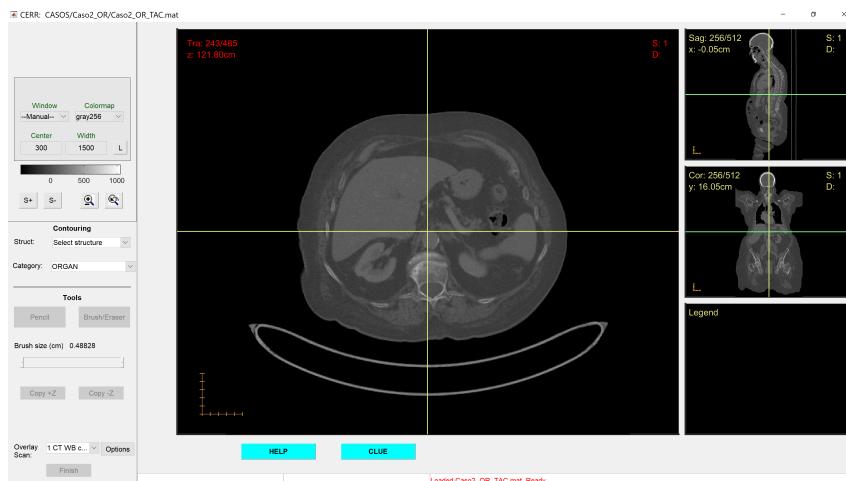


Figura 62: *Comenzar a segmentar*

6. Visualización de resultados

Tanto los especialistas como los alumnos tienen la opción de visualizar los resultados de las segmentaciones realizadas. La única diferencia es que, en el caso del especialista, este debe seleccionar previamente el alumno del que quiere conocer los resultados (desde el panel de selección que se muestra en la figura 55b). Además, en la interfaz de visualización de resultados se mostrará en la parte superior del panel de la izquierda el nombre del alumno del que está viendo los resultados (Figura 63).

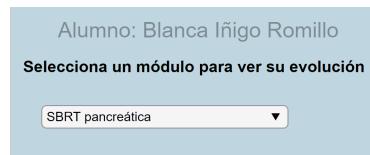


Figura 63: *Alumno seleccionado por el especialista.*

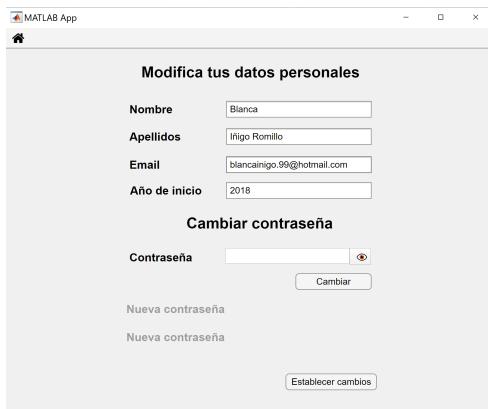
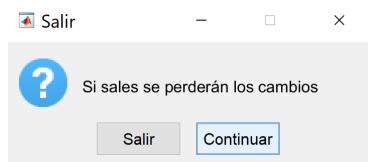
Con excepción de estas pequeñas diferencias, el resto de componentes de la interfaz son comunes para ambos roles:

- 6.1 **Resultados por módulo:** En primer lugar, se selecciona un módulo de los disponibles para el alumno (Figura 64a). Si el alumno no ha segmentado ningún caso de ese módulo, aparece un mensaje por pantalla informando al usuario y no se habilita el resto de opciones. En caso contrario, se muestra la calificación media de los casos segmentados para el módulo seleccionado, así como el número de casos segmentados del total de casos del módulo y un mensaje de motivación en función de la calificación obtenida.
- 6.2 **Resultados por caso:** En segundo lugar, el usuario deberá seleccionar el caso del listado del panel central y seleccionar la opción “**Ver detalles**”. Al hacerlo, aparece en el panel central la descripción del caso y su calificación media (Figura 64b).
- 6.3 **Resultados por modalidad, estructura y fecha:** Finalmente el usuario deberá seleccionar una modalidad, una estructura y una fecha para poder ver los resultados de las métricas asociadas a la segmentación de dicha estructura (Figura 64c). Nuevamente, el usuario puede recordar el significado de las métricas utilizadas pulsando el ícono de información (“**Explicación de las métricas**”) tal y como se muestra en la figura 48.

Figura 64: *Visualización de resultados para alumnos.*

7. Perfil de usuario

Los alumnos pueden configurar sus datos personales desde la opción “profile” ubicada en la esquina superior izquierda. Desde esta nueva pantalla, el alumno puede modificar su nombre, apellidos, email, año de inicio de residencia y contraseña tal y como se muestra en la figura 65. Si cierra la interfaz, aparece un mensaje de alerta informando de que se perderán los datos no guardados (Figura 66). Si, por el contrario, pulsa el botón “Establecer cambios”, se actualizan sus datos en la base de datos.

Figura 65: *Perfil del alumno.*Figura 66: *Mensaje de alerta.*

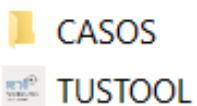
Por otro lado, y para que el sistema sea seguro, si un especialista quiere modificar sus datos deberá hacerlo a través de REDCap, modificando el registro correspondiente desde “Agregar / Editar registros”.

3.2.2.4. Empaquetamiento, instalación y ejecución de la aplicación

La aplicación se ha empaquetado de forma que no sea necesario una licencia de MATLAB para su ejecución. Sin embargo, si es necesaria la instalación del complemento MATLAB Runtime [38] que permite compilar el código de la aplicación. El empaquetamiento de la herramienta se ha hecho mediante el complemento *MATLAB Compiler* y ha generado un ejecutable que permite la instalación de la aplicación TUSTOOL así como de MATLAB Runtime (viene incluido en el paquete).

Para instalar la aplicación solo hay que seguir los pasos detallados en el manual de usuario del Anexo I.

Además, la carpeta con el archivo ejecutable incluirá también una carpeta con los casos que se han utilizado para las pruebas técnicas para que el usuario pueda comenzar a utilizar la herramienta.



3.2.3. Validación técnica

La aplicación consta de dos procesos principales que implican cálculos matriciales complejos y grandes conversiones de datos. Se trata de la herramienta de creación de casos y el cálculo de las métricas de comparación tras segmentar un caso. Ambas operaciones requieren una gran capacidad de procesamiento y tiempos de ejecución más extensos que el resto de operaciones.

En el caso de la **creación de casos**, el tiempo de ejecución dependerá de las modalidades que incluya el caso y del número de cortes de cada estudio de imagen: a más modalidades o a más cortes, mayor tiempo de ejecución.

La carga completa de un caso que contenga una modalidad TAC de imagen suele tardar en torno a 2 minutos y 45 segundos. Es un tiempo considerable de ejecución para el usuario pero, solo será necesaria esta espera cuando se quiera añadir un nuevo caso a la base de datos.

Por otro lado, los tiempos de **cálculo de los resultados** son proporcionales a diversos parámetros:

- El número de estructuras del caso que se hayan segmentado.
- El número de cortes que contiene la imagen.
- El volumen de las lesiones segmentadas.
- La resolución de las imágenes. La modalidad TAC presenta una mayor resolución que las modalidades PET y RM y, por tanto, hay más píxeles que comparar.

De este modo, el proceso de cálculo de métricas tras la segmentación de una única estructura suele tardar en torno a 1 minuto, del cual, aproximadamente la mitad del tiempo está dedicado al cálculo del coeficiente Kappa.

4. Conclusiones y líneas futuras

4.1. Conclusiones

Tras hacer un análisis completa del Trabajo de Fin de Titulación se puede afirmar que se han alcanzado los objetivos planteados: Crear una herramienta de entrenamiento de segmentación tumoral para médicos residentes que, además, sirva a médicos especialistas como un método adicional para el seguimiento y la evaluación de sus alumnos en el ámbito de radioterapia.

Las pruebas realizadas con la aplicación *TUSTOOL* han demostrado que se trata de una aplicación útil que, en un futuro cercano, podría ser instalada en hospitales y servir de apoyo en la formación de futuros oncólogos radioterapeutas. Además, todos los resultados de los residentes son almacenados en REDCap, por lo que los médicos podrán supervisar el trabajo de los residentes tanto desde la propia aplicación *TUSTOOL* como accediendo directamente a los reportes del proyecto de REDCap.

La aplicación *TUSTOOL* está lista para las pruebas de validación con médicos expertos y residentes. Una vez se instale en el Hospital, se establecerá un periodo de prueba, tras el cual se repartirán cuestionarios de usabilidad. Dichos cuestionarios permitirán recoger las perspectivas de los sanitarios y proporcionarán el *feedback* necesario para aplicar mejoras en aplicación y que esta pueda ser utilizada en otros centros sanitarios.

Este proyecto me ha permitido conocer las dificultades a las que se enfrentan los radioterapeutas a la hora de planificar un tratamiento a un paciente y lo importante que es una formación de calidad que garantice la eficacia del tratamiento y minimice sus riesgos. Por ello, es imprescindible que ingenieros y médicos trabajen en conjunto pues los médicos conocen de primera mano los problemas que se plantean en el ámbito sanitario y los ingenieros, por su parte, tienen los medios y conocimientos para crear soluciones.

4.2. Líneas futuras

En el corto plazo, la intención de este proyecto es que la aplicación *TUSTOOL* se implante en hospitales para ser utilizado por el personal sanitario. Para ello, se ha solicitado la aprobación de un estudio en el comité de ética del hospital que ha sido aprobado. Sería interesante que los médicos residentes pudieran hacer uso de la aplicación también desde sus ordenadores personales, de forma que, puedan continuar con su formación desde casa incluso en situaciones excepcionales como la de la reciente pandemia.

Con vistas en medio/largo plazo, se podrían implementar planes de formación personalizados para los médicos residentes. De esta forma, los especialistas podrían crear planes individuales que se adecuaran a la experiencia y rendimiento de cada alumno. Así mismo, se podrían crear nuevos módulos a medida que se obtuvieran nuevos casos de pacientes.

Además, la herramienta podría estar disponible para la formación de otros profesionales, como técnicos especialistas en radioterapia y médicos especialistas en oncología radioterápica como herramienta de reciclaje de conocimientos.

Además, podrían introducirse algunas mejoras de diseño y funcionales en la aplicación:

▪ **Función:**

- Sustituir la interfaz de creación de casos por una de **gestión de casos** desde la que también se puedan eliminar casos y su correspondiente información almacenada en REDCap.
- Añadir métricas de comparación que se basen en criterios volumétricos o de distancias (como la distancia Hausdorff [39][40]) para evaluar las segmentaciones de los residentes desde otras perspectivas.
- Añadir herramientas de segmentación (interpolación, algoritmos de segmentación semiautomática, etc.) que faciliten la identificación y el contorneo de las lesiones.

▪ **Diseño:**

- Poder visualizar gráficamente en la interfaz de resultados las segmentaciones realizadas por cada alumno y sus *Gold standards*.

Referencias

- [1] “Orden SCO/3142/2006, de 20 de septiembre, por la que se aprueba y publica el programa formativo de la especialidad de Oncología Radioterápica”. En: «*BOE*» 245 (2006), págs. 35519-35527.
- [2] Yoon WS et al. Kim YS Kim JW. “Interobserver variability in gross tumor volume delineation for hepatocellular carcinoma: Results of Korean Radiation Oncology Group 1207 study”. En: *Strahlenther Onkol* 192.10 (2016), págs. 714-721. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00066-016-1028-2>.
- [3] Kirste S et al. Gkika E Tanadini-Lang S. “Interobserver variability in target volume delineation of hepatocellular carcinoma: An analysis of the working group Stereotactic Radiotherapy of the German Society for Radiation Oncology (DEGRO)”. En: *Strahlenther Onkol* 193.10 (2017), págs. 823-830. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00066-017-1177-y>.
- [4] Jean-François Daisne y Andreas Blumhofer. “Atlas-based automatic segmentation of head and neck organs at risk and nodal target volumes: a clinical validation”. En: *Daisne and Blumhofer Radiation Oncology* 8:154 (2013).
- [5] Armato SG 3rd et al. Yang J Veeraraghavan H. “Autosegmentation for thoracic radiation treatment planning: A grand challenge at AAPM 2017”. En: *Med Phys* 45.10 (2018), págs. 4568-4581. DOI: <https://doi.org/10.1002/mp.13141>.
- [6] Ch.vez-Vizcarra P et al. Cervantes-S.nchez CR. “Qué y cómo se evalúa la competencia clínico-quirúrgica: perspectiva del adscrito y del residente de cirugía”. En: *Cirujía y Cirujanos* 84.4 (2016), págs. 301-308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.circir.2015.09.002>.
- [7] Thompson-Burdine J et al. Sandhu G. “Bridging the gap: the intersection of entrustability and perceived autonomy for surgical residents in the OR”. En: *Am J Surg* 2019 217.2 (2018), págs. 276-280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2018.07.057..>
- [8] Joaquín Alonso-Martín et al. José Carlos Manuel-Palazuelos. “Programa de formación del residente de cirugía en un laboratorio experimental de cirugía mínimamente invasiva (CENDOS)”. En: *Cirugía Española* 85.2 (2009), págs. 84-91. DOI: DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ciresp.2008.07.004>.
- [9] Antonio Allona Almagro y Arturo Platas Sancho. “ESTABLECIMIENTO DE UN PROGRAMA DE CIRUGÍA ROBÓTICA EN UN HOSPITAL.” En: *SciELO Analytics* 60.4 (2007), págs. 371-374.
- [10] L. Wiley Nifong y W. Randolph Chitwood Evelio Rodríguez. “ENTRENAMIENTO EN TELE-CIRUGÍA Y CIRUGÍA ROBÓTICA: SEIS AÑOS DE EXPERIENCIA.” En: *SciELO Analytics* 60.4 (2007), págs. 363-369.
- [11] Bhavya R. Shah et al. Chandan Ganesh Bangalore Yogananda. “A Fully Automated Deep Learning Network for Brain Tumor Segmentation”. En: *Tomography* 6.2 (2020), págs. 186-193. DOI: DOI:<https://doi.org/10.18383/j.tom.2019.00026>.

- [12] Karar et al. Zeineldin R.A. “DeepSeg: deep neural network framework for automatic brain tumor segmentation using magnetic resonance FLAIR images”. En: *SpringerLink* 15 (2020), págs. 909-902. DOI: [DOI:https://doi.org/10.1007/s11548-020-02186-z](https://doi.org/10.1007/s11548-020-02186-z).
- [13] Inc RadOnc eLearning Center. *Electronic References*. URL: <https://www.educase.com/>.
- [14] Jaswal et al. D’Souza. “Development and Feasibility of an Online Anatomy and Radiology Contouring (ARC) Bootcamp for Radiation Oncology Residents”. En: *ROECSG* (2020), pág. 11.
- [15] Inc RadOnc eLearning Center. *eduMod*. URL: https://www.educase.com/index.php?option=com_content&view=article&id=44&Itemid=120.
- [16] J.Amdur et al. Deraniyagala. “Usability study of the EduMod eLearning Program for contouring nodal stations of the head and neck”. En: *Elsevier* 5.3 (2015), págs. 169-175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prro.2014.10.008>.
- [17] TCM Academy. Image Reporting Simulator. *Image Reporting Simulator*. URL: <https://academy.telemedicineclinic.com/image-reporting-simulator/>.
- [18] *eContour*. URL: <https://econtour.org/>.
- [19] Lundy et al. Panjwani. “Five-Year Development and Usage Outcomes of eContour, a Web-Based Interactive Contouring Atlas”. En: *Radiation Oncology* 111.3 (2021), pág. 190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2021.07.695>.
- [20] *MATLAB*. URL: <https://es.mathworks.com/help/matlab/>.
- [21] *CERR: Computational Environment for Radiological Research*. URL: <https://nmmi.tools.org/2019/08/21/cerr/>.
- [22] *CERR*. URL: <https://github.com/cerr/CERR>.
- [23] *REDCap*. URL: <https://www.project-redcap.org/>.
- [24] Documentación de la API *REDCap*. URL: <https://bioinfo.irycis.org/redcap/api/help/>.
- [25] *Using the REDCap API*. URL: <https://education.arcus.chop.edu/redcap-api/>.
- [26] “REGLAMENTO (UE) 2016/679 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 27 de abril de 2016 relativo a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos y por el que se deroga la Directiva 95/46/CE (Reglamento general de protección de datos)”. En: «*BOE*» (2016).
- [27] “Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales”. En: «*BOE*» 294 (2018).
- [28] “Ley 41/2002, de 14 de noviembre, básica reguladora de la autonomía del paciente y de derechos y obligaciones en materia de información y documentación clínica”. En: «*BOE*» 274 (2002).
- [29] Valentini et al. “Recommendations on how to establish evidence from auto-segmentation software in radiotherapy”. En: *Radiotherapy and oncology* 112 (2014), págs. 317-320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2014.09.014>.

- [30] Dicoogle. *Dicoogle*. URL: <https://dicoogle.com/>.
- [31] Webwrite. URL: <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/webwrite.html>.
- [32] Kyle Wang y Joel E. Tepper. “Radiation therapy-associated toxicity: Etiology, management, and prevention”. En: *CA CANCER* 71 (2021), págs. 437-454. DOI: <https://doi.org/10.3322/caac.21689>.
- [33] *ESTIMACION DE LA EXACTITUD DE UNA CLASIFICACION - MATRIZ DE CONFUSION*. URL: <https://www.teledet.com/tutorial-imagenes-satelitales/clasificacion-matriz-confusion.htm>.
- [34] Raman et al. “The Impact of MRI on Gross Tumor Volume Delineation in Non-Spine Bony Metastasis Treated with Stereotactic Body Radiation Therapy”. En: *Radiotherapy and oncology* 12.4 (2018), págs. 735-743. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2018.03.010>.
- [35] Schimek-Jasch et al. “A teaching intervention in a contouring dummy run improved target volume delineation in locally advanced non-small cell lung cancer”. En: *Strahlentherapie und Onkologie* 191 (2015), págs. 525-533. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00066-015-0812-8>.
- [36] J. Richard Landis y Gary G. Koch. “The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data”. En: *International Biometric Society* 33.1 (2015), págs. 159-174. DOI: <https://doi.org/10.2307/2529310>.
- [37] Sharp et al. “Perspectives on automated image segmentation for radiotherapy”. En: *CA CANCER* 41.5 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1118/1.4871620>.
- [38] *Matlab runtime*. URL: <https://es.mathworks.com/products/compiler/matlab-runtime.html>.
- [39] G. A. Klanderman D. P. Huttenlocher y W. J. Rucklidge. “Comparing images using the Hausdorff distance”. En: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 15.9 (1993), págs. 850-863. DOI: <https://doi.org/10.1109/34.232073>.
- [40] *Hausdorff Distance*. URL: <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26738-hausdorff-distance>.

5. Anexos

5.1. ANEXO I: PROTOTIPO DE LA APLICACIÓN

En el siguiente apartado, se muestran los diseños creados desde la herramienta *Canva* para el prototipado de la aplicación. Como se observa en las siguientes figuras, se ha optado por una aplicación con un diseño sencillo e intuitivo que presenta múltiples pestañas de ayuda para facilitar su uso. La aplicación consta de numerosas interfaces que varían en función del rol de usuario.

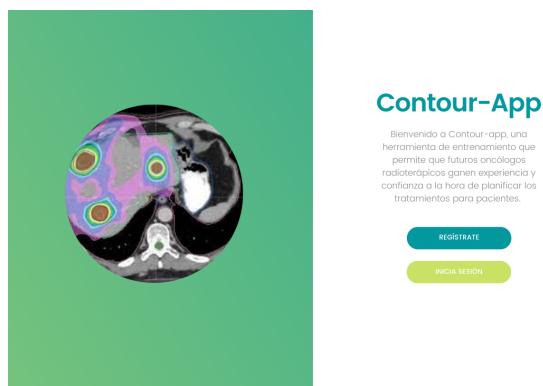


Figura 67: *Pantalla inicial*

The image displays two user interface prototypes side-by-side. On the left, under the heading 'Crea tu nueva cuenta', is a form for creating a new account. It includes fields for 'NOMBRE' (with placeholder 'Juan Martínez'), 'EMAIL' (with placeholder 'hellobigdaddygreatsite.com'), 'CONTRASEÑA' (with placeholder '*****'), and 'AÑO DE COMIENZO DE LA RESIDENCIA' (with placeholder 'Select'). A 'CREAR CUENTA' button is at the bottom. On the right, under the heading 'Inicia sesión', is a form for logging in. It includes fields for 'EMAIL' (with placeholder 'hellobigdaddygreatsite.com') and 'CONTRASEÑA' (with placeholder '*****'). A 'INICIAR SESIÓN' button is at the bottom. Both forms have a teal header bar above them.

(a) *Registro de usuario*

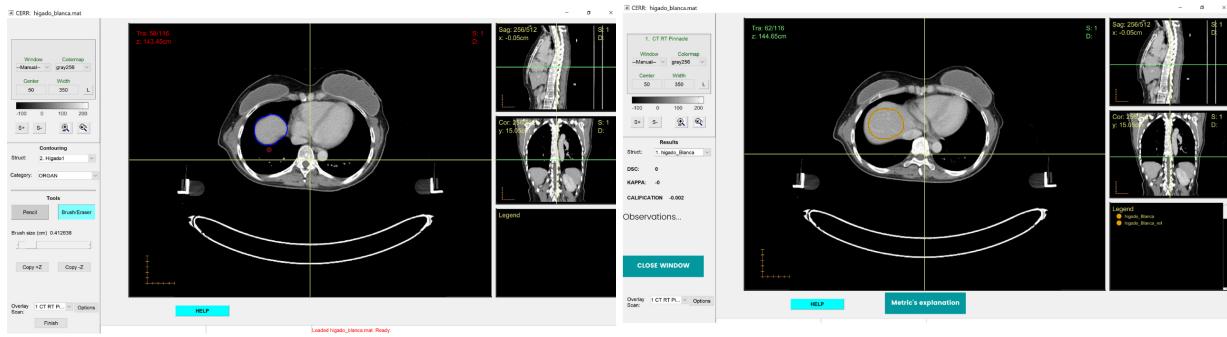
(b) *Inicio de sesión*

Figura 68: *Gestión de usuarios*



(a) Menú principal de residente

(b) Contorneo



(c) Finalizar segmentación

(d) Visualizar resultados

Figura 69: Segmentación tumoral



(a) Resumen de resultados

(b) Resultados por caso

Figura 70: Visualización de resultados



Información personal

NOMBRE
Jairo Martins

EMAIL
helio@rodrigodelete.com

NUEVA CONTRASEÑA

REPETIR CONTRASEÑA

AÑO DE RESIDENCIA
Select

GUARDAR CAMBIOS

Figura 71: *Configuración del perfil*


¿Quéquieres hacer?

CREAR NUEVO CASO
Crea nuevos casos a partir de estudios DICOM con el formato adecuado para que sean empleados por la app. Será necesario incluir información adicional del nuevo caso.

VER RESULTADOS
Visualiza tus resultados gráficamente y selecciona el caso del que te interese conocer los detalles.

COMENZAR **COMENZAR**

Crear un nuevo caso médico

SELECCIONA LA CARPETA

MÓDULO Select

MODALIDADES MRI AC PET

NOMBRE DEL CASO

ANADE NOTAS DEL CASO SI PROCEDE

NIVEL DE DIFICULTAD Select

ESTRUCTURAS A SEGMENTAR

DESCRIPCIÓN

CONVERTIR

(a) *Menú principal de especialista*(b) *Creación de nuevos casos*(c) *Visualización de resultados*Figura 72: *Funciones del especialista*

5.2. ANEXO II: MANUAL DE USUARIO



MANUAL DE USUARIO

Blanca Iñigo Romillo

Enero 2022

CON LA COLABORACIÓN DE:



Índice

1. Introducción	2
1.1. Instalación	3
1.2. Pantalla inicial	5
1.3. Registro e inicio de sesión	5
1.4. Menú principal	7
1.5. Creación de casos.	7
1.6. Segmentación de casos	9
1.7. Visualización de resultados	15
1.8. Perfil de usuario	17
1.9. Desinstalación	18

MANUAL DE USUARIO DE LA HERRAMIENTA DE APRENDIZAJE EN CONTOREO PARA RESIDENTES DE ONCOLOGÍA RADIOTERÁPICA

1. Introducción

Se ruega leer detenidamente los apartados mostrados en el siguiente manual antes de la primera ejecución del programa y recurrir a él siempre que sea necesario.

La herramienta TUSTOOL es una herramienta de apoyo para la formación de médicos residentes en el contorneo de estructuras y lesiones anatómicas como parte de la planificación del tratamiento radioterápico. Así mismo, constituye un método de seguimiento y supervisión continua de la evolución de los residentes en el ámbito de segmentación tumoral por parte de los médicos especialistas que los forman.

Es un software libre de licencias, de fácil instalación y uso. Esta aplicación requiere un complemento llamado MATLAB Runtime cuyo paquete de instalación dependerá del sistema operativo del dispositivo empleado y que se puede encontrar y descargar desde el siguiente enlace:

<https://es.mathworks.com/products/compiler/matlab-runtime.html>

Del mismo modo, el repositorio de casos a los que tiene acceso la aplicación se podrá ubicar en una carpeta local o en una carpeta de red compartida, siempre y cuando el usuario tenga derecho de lectura y de escritura sobre ese directorio. Dicha carpeta deberá tener una estructura concreta, tal y como se muestra en la siguiente figura:

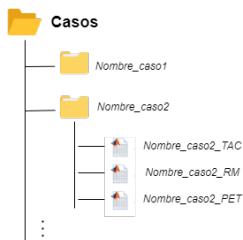


Figura 2: Estructura de la carpeta de casos.

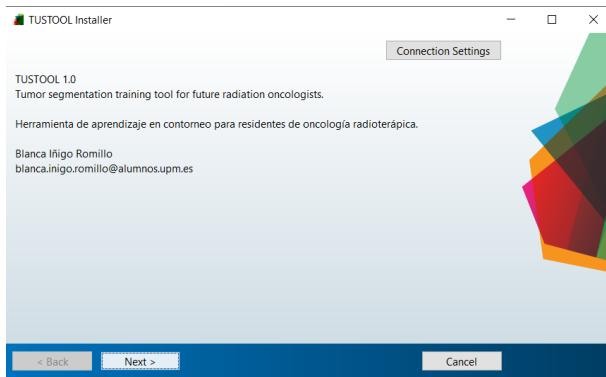
Cabe destacar que la herramienta TUSTOOL está disponible para dos tipos de usuario: residentes y médicos especialistas. En función del rol de usuario, este contará con distintas funcionalidades:

- Los **residentes**, por su parte, podrán filtrar casos según su módulo, nivel de dificultad y modalidad de imagen y segmentar sus estructuras. Además podrán ver los resultados obtenidos por módulo, caso y estructura contorneada.
- Por otro lado, los **médicos expertos** podrán crear nuevos casos, aportando información sobre el estudio y las estructuras a segmentar. Del mismo modo, los especialistas también podrán ver los resultados de cualquier residente para mantenerse actualizados sobre sus avances.

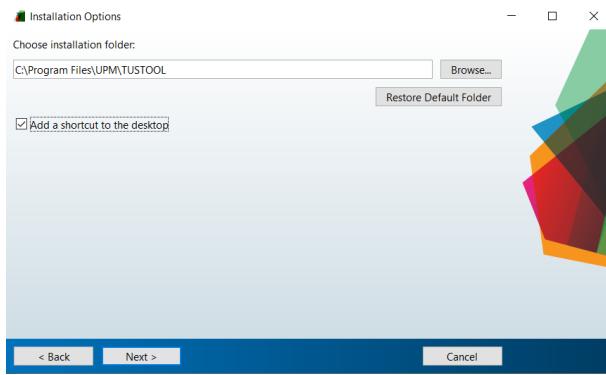
1.1. Instalación

Para instalar la herramienta, el usuario solo tendrá que iniciar el ejecutable *TUSTOOL.exe*.

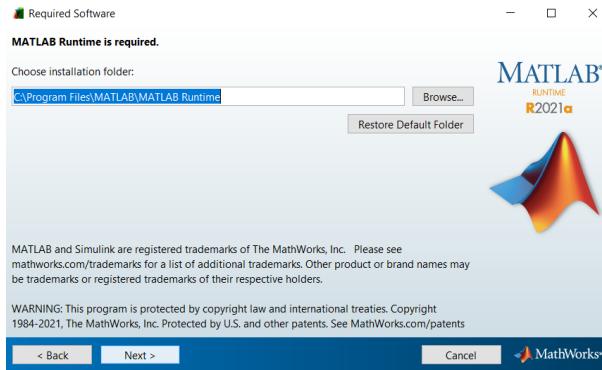
1. Comienzo proceso de instalación.



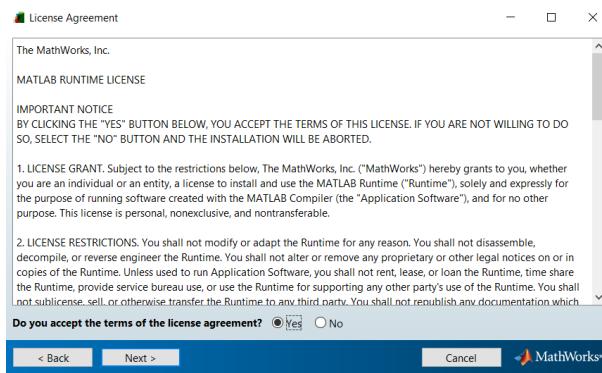
2. Se instala el programa en el directorio establecido por defecto (Archivos de programa o en inglés *Program Files*). Marcar la casilla para añadir un acceso directo a la aplicación en el escritorio (Recomendado).



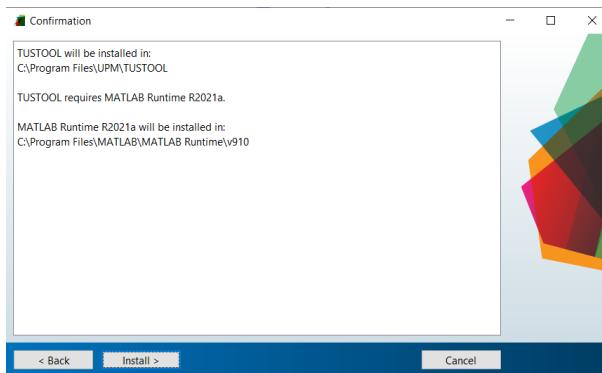
3. Instalación del complemento MATLAB Runtime.



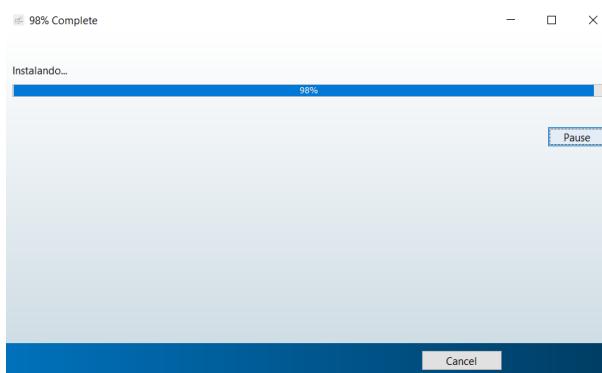
4. Aceptar los términos y condiciones de MATLAB Runtime.



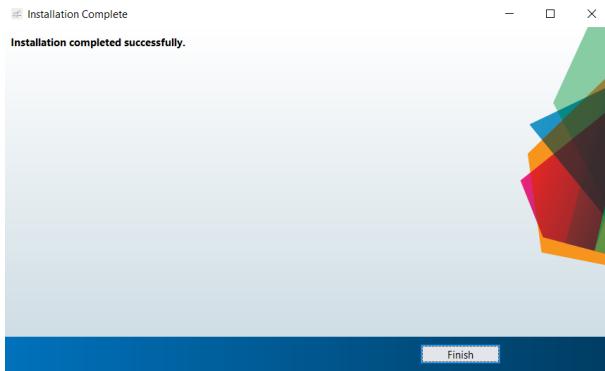
5. Confirmar la instalación de la aplicación con el complemento necesario.



6. Instalando la aplicación TUSTOOL y MATLAB Runtime.



7. Una vez instalado, cierre la ventana y ya puede iniciar la aplicación desde archivos de programa o desde el acceso directo del escritorio.



1.2. Pantalla inicial

La página principal ofrece una breve introducción sobre la herramienta y ofrece al usuario la posibilidad de iniciar sesión o de registrarse como un nuevo usuario (Figura 3).

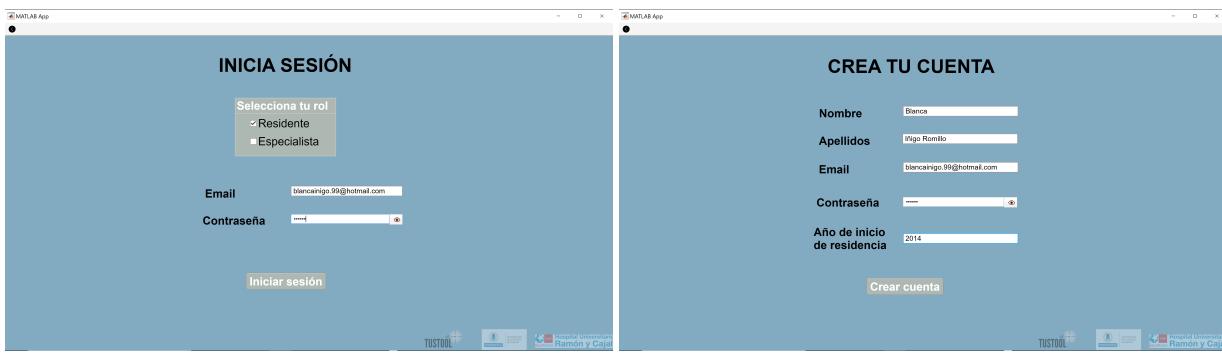


Figura 3: *Pantalla inicial*.

1.3. Registro e inicio de sesión

Si el usuario decide iniciar sesión, debe introducir sus credenciales para acceder al menú principal (Figura 4a).

En el caso de que sea la primera vez que un alumno utiliza la aplicación, este deberá introducir sus datos personales para registrarse (Figura 4b).

(a) *Inicio de sesión.*(b) *Registro.*Figura 4: *Registro e inicio de sesión*

El sistema muestra un mensaje de alerta que informa al usuario del problema ocurrido en las siguientes situaciones:

- En caso de que el usuario no rellene alguno de los campos obligatorios.
- Si trata de iniciar sesión con credenciales incorrectas.
- Si alguno de los campos introducidos no sigue el formato adecuado.
- Si no existe el usuario que intenta iniciar sesión.
- Si ya existe el usuario que se está registrando.

En el caso de **inicio de sesión**, el sistema accede a REDCap y comprueba que existe el usuario.

En el caso de **registro**, el sistema comprueba que no existe un usuario con el mismo correo electrónico y, en caso de que no exista, crea un nuevo registro en la tabla **ALUMNOS**.

Finalmente, el usuario accede al menú principal de la herramienta.

Si un médico especialista quiere registrarse en el sistema, deberá hacerlo a través de REDCap. Deberá acceder al proyecto **RADIOTERAPIASEGMENTATION**, seleccionar la opción del panel de la izquierda *Agregar / Editar registros, Agregar un nuevo registro* y elegir el formulario de entrada llamado “**ESPECIALISTAS**”. A continuación aparecerá un formulario en el que el especialista deberá introducir sus datos tal y como se muestra en la siguiente figura.

editando actualmente Record ID 4

Record ID 4

Nombre
* debe aportar un valor

Apellidos
* debe aportar un valor

Email
* debe aportar un valor

Contraseña
* debe aportar un valor

Especialidad

Form Status

Complete? Incomplete

Guardar y Salir Save & Go To Next Record

--Cancelar--

Figura 5: Registro de especialistas.

1.4. Menú principal

El menú principal de la aplicación varía en función de si el usuario es un residente o un especialista.

Si el usuario es un **residente** encontrará dos opciones principales: Segmentar casos o visualizar los resultados (Figura 6a). Así mismo, el alumno tiene la opción de modificar sus datos personales desde el ícono del perfil de la esquina superior izquierda.

Si, por el contrario, el usuario es un **médico especialista**, la interfaz mostrará una opción de crear nuevos casos y otra de visualizar los resultados(Figura 6b). En este caso, el usuario tendrá que seleccionar el alumno del que quiere conocer los resultados.

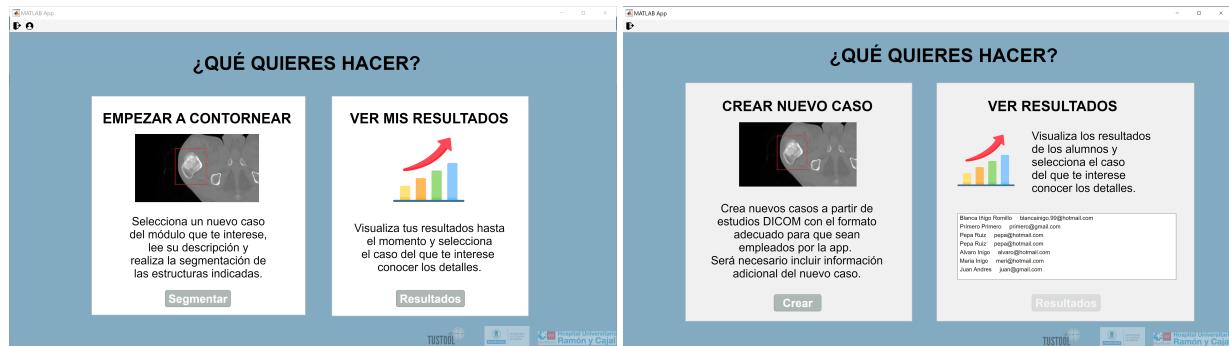


Figura 6: Menú principal

1.5. Creación de casos.

Una de las funcionalidades disponibles para los especialistas es la creación de nuevos casos médicos. Desde la interfaz responsable de esta función, el especialista debe seleccionar

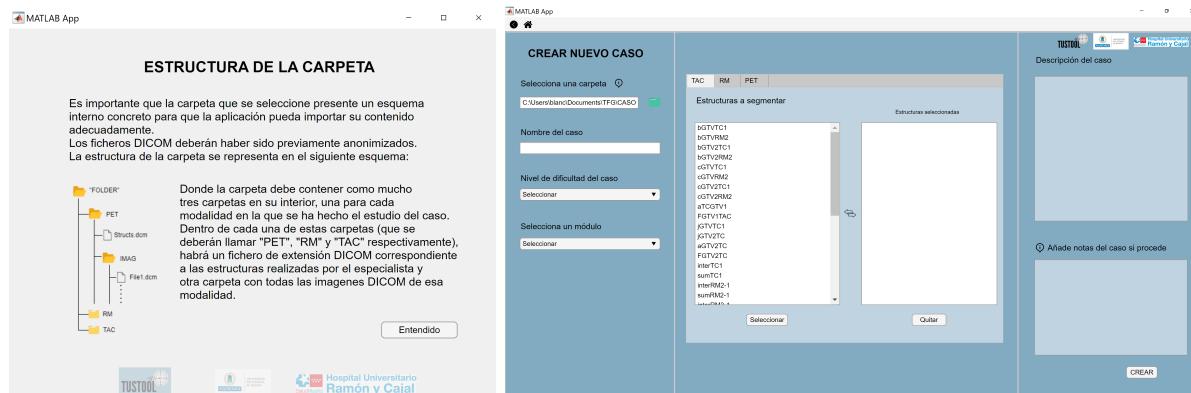
la carpeta con el caso en cuestión. Es importante que la carpeta tenga una estructura de ficheros concreta que el usuario puede conocer haciendo click en el ícono de información (Figura 7a).

A continuación, el sistema ejecuta una serie de funciones que convierten el documento en ficheros *.mat* (tantos como modalidades tenga el caso). Este proceso puede llevar varios minutos en función del número de modalidades que se estén convirtiendo. El usuario será informado del progreso de la operación mediante barras de estado. Además, el programa obtiene de cada modalidad las estructuras de referencia asociadas para mostrárselas al especialista por pantalla en el panel central.

Una vez se han convertido los archivos, se habilitan el resto de botones y cuadros de texto de la interfaz. En este momento, el especialista tendrá que completar los datos asociados al nuevo caso (Nombre del caso, nivel de dificultad, módulo al que pertenece, estructuras a segmentar, descripción del caso y realimentación) (Figura 7b). Nuevamente, los iconos de información ayudarán al alumno en caso de duda (Figura 8).

Por último, el usuario debe seleccionar el botón “**Crear**” con lo que se comprueba que todos los campos obligatorios estén completos y que no exista ya un caso con ese nombre en la base de datos. Si se cumplen ambas condiciones, se le pide al usuario un directorio en el que guardar el archivo generado eliminando antes la información de las estructuras que no se han seleccionado. Finalmente, se almacena toda la información del nuevo caso en la tabla correspondiente del proyecto de REDCap.

Cabe destacar que, dado que los ficheros *.mat* de los estudios se almacenan localmente, cada vez que un especialista cree un nuevo caso, deberá compartir el fichero generado con sus alumnos para que estos puedan segmentar sus estructuras.



(a) *Estructura de la carpeta.*

(b) *Información del caso*

Figura 7: *Crear nuevos casos.*

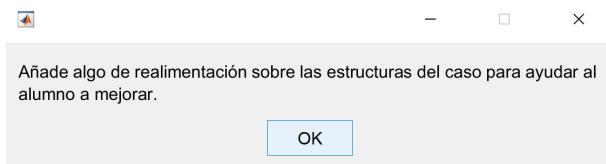


Figura 8: *Mensajes de ayuda.*

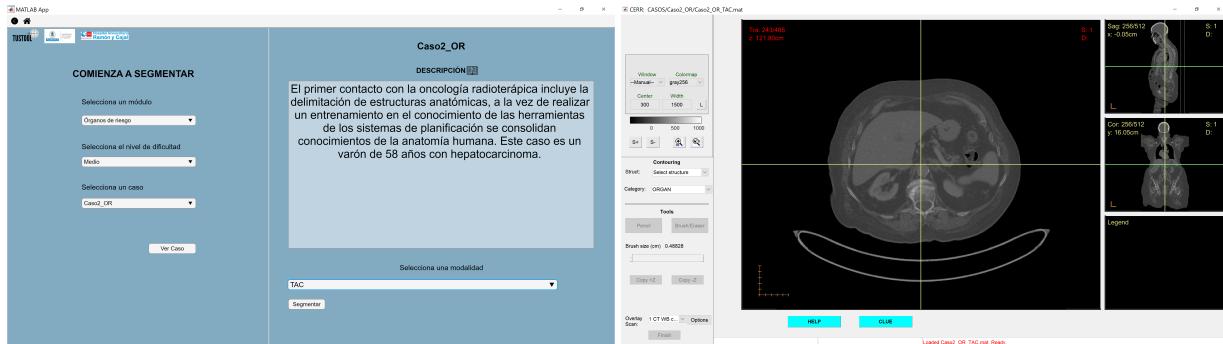
1.6. Segmentación de casos

La funcionalidad principal de la aplicación y con la implementación más compleja es la interfaz de segmentación. Esta herramienta consta de dos interfaces: una interfaz de selección del caso a segmentar y la interfaz de segmentación en sí.

Cuando el usuario accede a la opción de “**Empezar a contornear**” del menú principal, se abre una nueva pestaña desde la que el alumno irá aplicando filtros hasta seleccionar el caso que desea contornear:

1. **Selección del módulo:** Tal y como se ha definido en el apartado ??, el listado de módulos que se mostrará al alumno dependerá de su año de residencia que, a su vez dependerá del año de inicio y del mes y año actual (los cursos comienzan en Mayo). Una vez seleccionado el módulo, se habilita el selector del nivel de dificultad.
2. **Selección del nivel de dificultad:** Cada módulo incluye casos que han sido clasificados en función de su grado de dificultad por el especialista que lo haya importado en *TUSTOOL*. Por consiguiente, el alumno deberá filtrar los casos del módulo seleccionado en función de si quiere aquellos de nivel **básico**, **medio** o **elevado**.
3. **Selector del caso:** A continuación, se habilita un desplegable con todos los casos que cumplen con los criterios de pertenencia al módulo y al nivel de dificultad establecidos.
4. **Información del caso:** El usuario podrá modificar cualquiera de sus elecciones, con lo que se actualizarán las opciones disponibles en los desplegables inferiores. Cuando se hayan elegido las tres opciones, el usuario debe hacer click en el botón de “**ver caso**”, con lo que se mostrará la descripción del caso y se cargan las modalidades disponibles para el caso en cuestión en el panel de la derecha de la figura 9a.
5. **Comenzar a segmentar:** Por último, se selecciona el botón de “**Segmentar**”. En este momento, se comprueba si el alumno ha trabajado con este caso en las últimas 24 horas. Si lo ha hecho, aparece un mensaje por pantalla informándole de que debe seleccionar otro caso u otra modalidad del mismo caso que no haya segmentado ese

día o esperar 24 horas a que se habilite. Este requisito pretende evitar que el alumno memorice la solución de un caso y lo repita. Tras esta comprobación, se le pide al usuario que seleccione la carpeta en la que tiene almacenados los casos (Ver figura ??). A continuación, se recupera el archivo correspondiente al caso seleccionado y, si existe dentro de la carpeta seleccionada, se abre la interfaz de segmentación, cargando dicho archivo (Figura 9b).



(a) Selección de caso a segmentar.

(b) Comenzar a segmentar

Figura 9: Interfaces de segmentación.

Desde la interfaz de segmentación el alumno podrá visualizar los cortes coronales, sagitales y transversales del caso seleccionado y moverse entre los cortes de tres formas distintas:

- Utilizando tanto las flechas hacia arriba y hacia abajo del teclado.
- Haciendo *scroll* con el ratón.
- Mediante los botones **S+** y **S-** del panel de la izquierda (Figura 10).



Figura 10: Cambio de slice.

En la esquina superior izquierda del visor central, el usuario podrá ver en qué corte se encuentra.

Además, para mejorar la visualización de las estructuras, se podrá modificar el contraste de dos formas:

- Seleccionando el botón “L” del panel izquierdo y después haciendo click sobre el visor principal y arrastrando arriba o abajo.

- Cambiando los valores de nivel y ventana manualmente en el mismo panel (Figura 11).

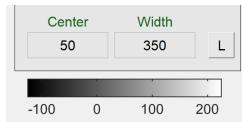


Figura 11: *Cambio de contraste.*

Del mismo modo, para asegurar una correcta delimitación de las estructuras, el usuario puede hacer o deshacer zoom sobre la imagen empleando los correspondientes botones del panel superior izquierdo (Figura 12).



Figura 12: *Zoom.*

A continuación, el usuario debe seleccionar la estructura a segmentar desde el desplegable del panel de la izquierda así como la categoría a la que pertenece (Figura 13).

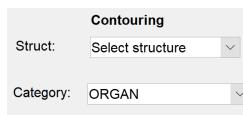
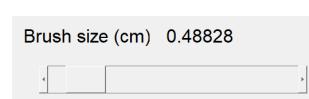


Figura 13: *Selección de estructura.*

Una vez seleccionada la estructura, se habilitan las herramientas de contorneo y el botón *Finish*, con lo que el usuario puede comenzar a contornear sobre las imágenes con líneas simples utilizando el *Pencil* o con esferas, mediante la herramienta *Brush* (Figura 14a) y la barra de selección de radio (Figura 14b).



(a) *Pencil y brush.*



(b) *Selección de radio*

Figura 14: *Herramientas de contorneo.*

Con el objetivo de agilizar el contorneo de las estructuras, el usuario puede copiar y pegar los contornos de un corte a otro adyacente mediante los botones *Copy +Z* y *Copy -Z* del panel de la izquierda (Figura).



Figura 15: *Copiar y pegar estructuras.*

En todo momento, el usuario contará con dos botones de ayuda en la parte inferior de la interfaz:



- **HELP**: Mostrará el manual de usuario correspondiente a la interfaz de segmentación.
- **CLUE**: Proporcionará pistas, si las hay, que el especialista ha indicado en la creación del caso sobre las estructuras más conflictivas.

Una vez el alumno ha terminado de segmentar todas las estructuras, deberá pulsar esta opción. Al hacerlo, y para evitar posibles errores, el sistema muestra el siguiente mensaje por pantalla:

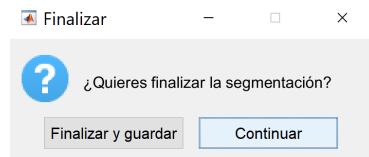


Figura 16: *Finalizar segmentación.*

Al seleccionar "Finalizar y guardar", se comparan las estructuras con sus *gold standards* y se calculan los coeficientes estadísticos y las calificaciones para cada una de ellas. Este proceso conlleva un tiempo de ejecución que dependerá del número de estructuras segmentadas. El usuario podrá ir viendo la evolución de los cálculos realizados mediante barras de estado tal y como se muestra en la siguiente figura.



Figura 17: *Barra de estado.*

Al finalizar el proceso, se modifica la interfaz para mostrar las estructuras y los resultados.

En la nueva interfaz, desaparecen las herramientas de contorneo y en su lugar se muestra un desplegable desde el que el usuario debe seleccionar una de las estructuras que ha segmentado previamente. Al seleccionar la estructura, se muestran los resultados de las métricas y la calificación obtenida en el panel de la izquierda (Figura 18) así como los contornos realizados y sus correspondientes *gold standards* en los tres visores del caso.

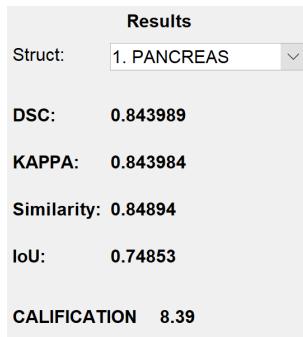


Figura 18: *Resultados*.

Las estructuras realizadas por el alumno siempre aparecerán en color naranja mientras que las de referencia serán verdes. Además, el panel inferior derecho con el nombre **Legend** mostrará el nombre de la estructura que se está visualizando y el de la estructura de referencia (que siempre tendrá la forma **nombre_estructura + " _ref"**) (Figura 19).

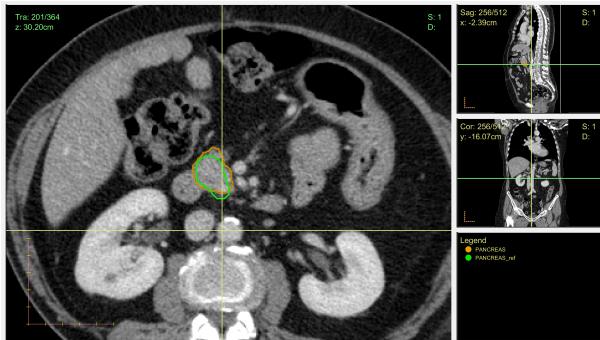


Figura 19: *Visualizar estructuras*.

Además, el usuario podrá seleccionar la vista que quiere ver en el visor principal haciendo doble click sobre ella (Figura 20).

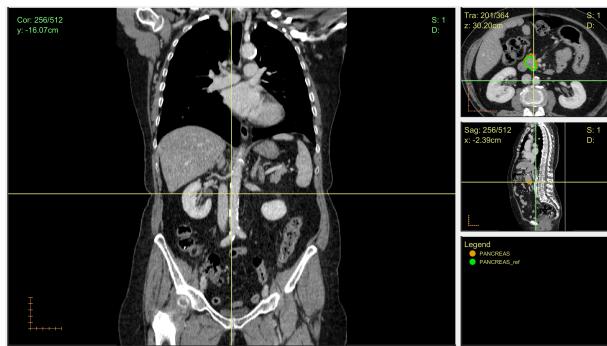


Figura 20: *Cambiar de vista.*

En la interfaz de resultados, el botón "Metrics" (Figura 22) proporciona información detallada sobre el cálculo de cada una de las métricas de comparación (Figura) así como la fórmula empleada para hallar la calificación final de cada estructura segmentada (Figura 21).

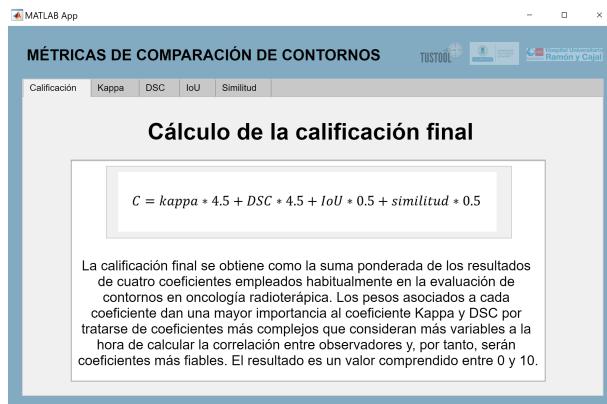


Figura 21: Cálculo de la calificación

(a) Coeficiente Kappa.

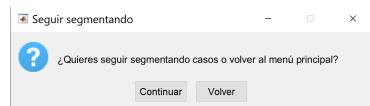
(b) Coeficiente DSC.

(c) Intersection over Union.

(d) Similitud.

Figura 22: Métricas de comparación.

Para terminar, el alumno deberá cerrar la interfaz de segmentación, con lo que el sistema le preguntará si desea seguir segmentando casos o volver al menú principal (Figura 23).

Figura 23: *Seguir segmentando*.

1.7. Visualización de resultados

Tanto los especialistas como los alumnos tienen la opción de visualizar los resultados de las segmentaciones realizadas. La única diferencia es que, en el caso del especialista, este debe seleccionar previamente el alumno del que quiere conocer los resultados (desde el panel de selección que se muestra en la figura 6b). Además, en la interfaz de visualización de resultados se mostrará en la parte superior del panel de la izquierda el nombre del

alumno del que está viendo los resultados (Figura 24).

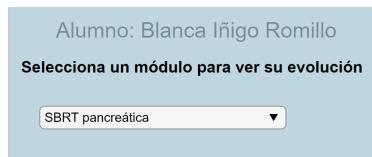


Figura 24: *Alumno seleccionado por el especialista.*

Con excepción de estas pequeñas diferencias, el resto de componentes de la interfaz son comunes para ambos roles:

1. **Resultados por módulo:** En primer lugar, se selecciona un módulo de los disponibles para el alumno (Figura 25a). Si el alumno no ha segmentado ningún caso de ese módulo, aparece un mensaje por pantalla informando al usuario y no se habilita el resto de opciones. En caso contrario, se muestra la calificación media de los casos segmentados para el módulo seleccionado, así como el número de casos segmentados del total de casos del módulo y un mensaje de motivación en función de la calificación obtenida.
2. **Resultados por caso:** En segundo lugar, el usuario deberá seleccionar el caso del listado del panel central y seleccionar la opción “**Ver detalles**”. Al hacerlo, aparece en el panel central la descripción del caso y su calificación media (Figura 25b).
3. **Resultados por modalidad, estructura y fecha:** Finalmente el usuario deberá seleccionar una modalidad, una estructura y una fecha para poder ver los resultados de las métricas asociadas a la segmentación de dicha estructura (Figura 25c). Nuevamente, el usuario puede recordar el significado de las métricas utilizadas pulsando el ícono de información (“**Explicación de las métricas**”) tal y como se muestra en la figura 22.

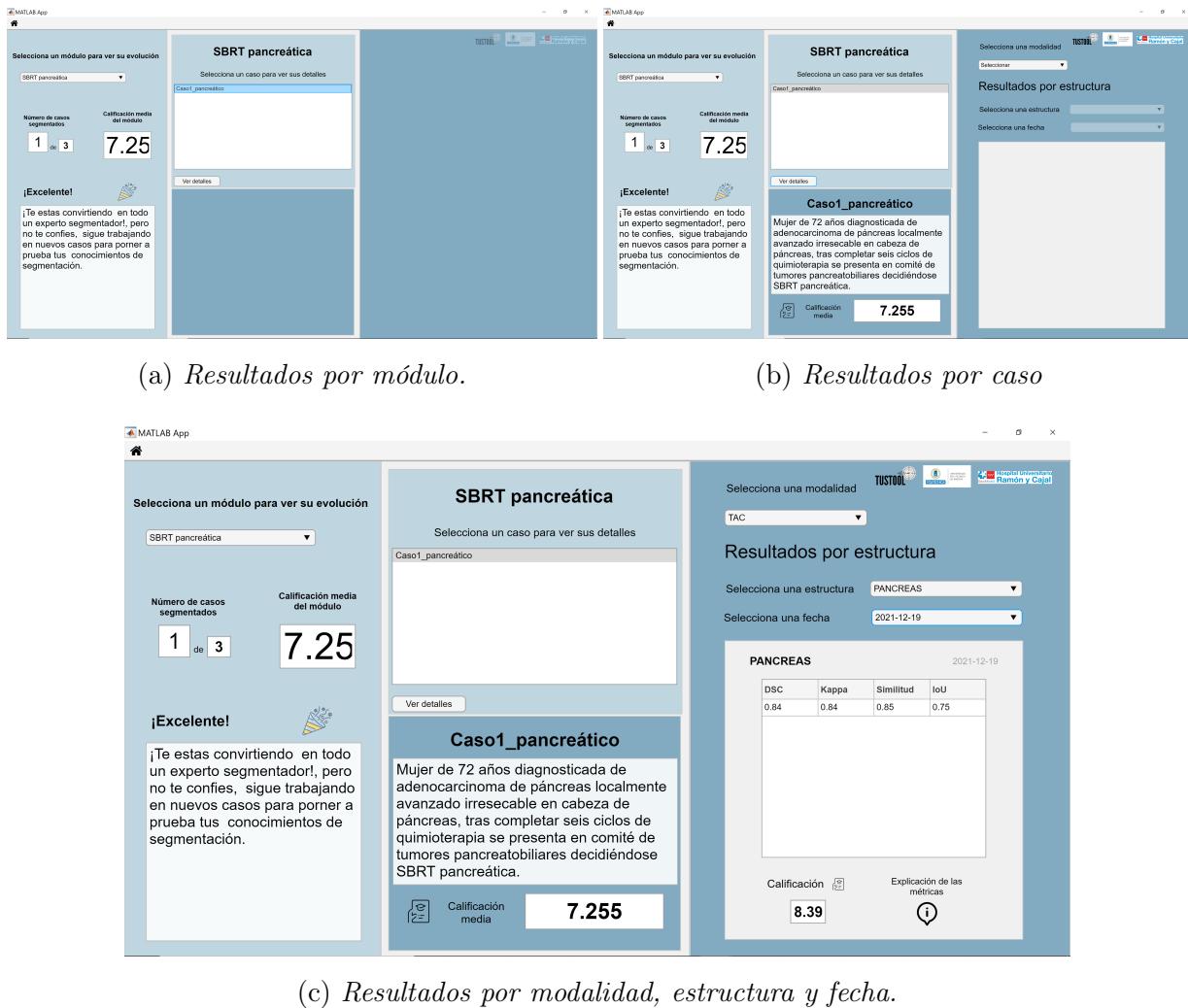


Figura 25: Visualización de resultados para alumnos.

1.8. Perfil de usuario

Los alumnos pueden configurar sus datos personales desde la opción “**profile**” ubicada en la esquina superior izquierda. Desde esta nueva pantalla, el alumno puede modificar su nombre, apellidos, email, año de inicio de la residencia y contraseña tal y como se muestra en la figura 26. Si cierra la interfaz, aparece un mensaje de alerta informando de que se perderán los datos no guardados (Figura 27). Si, por el contrario, pulsa el botón “**Establecer cambios**”, se actualizan sus datos en la base de datos.

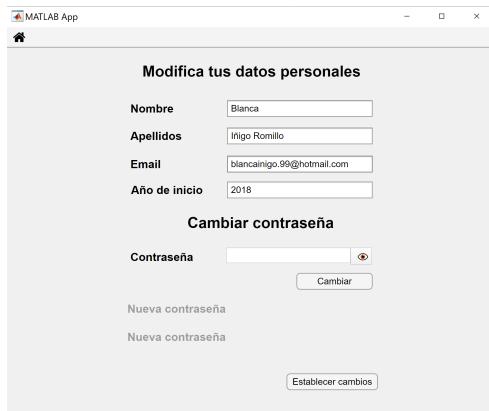


Figura 26: *Perfil del alumno.*

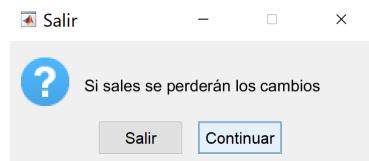


Figura 27: *Mensaje de alerta.*

Por otro lado, y para que el sistema sea seguro, si un especialista quiere modificar sus datos deberá hacerlo a través de REDCap, modificando el registro correspondiente desde “*Agregar / Editar registros*”.

1.9. Desinstalación

Para desinstalar la aplicación y MATLAB Runtime, se deben seguir unos sencillos pasos:

1. Desde el panel de control, busque “TUSTOOL”.
2. Pulse “desinstalar”.
3. Siga las instrucciones del panel que aparece por pantalla.
4. Tras finalizar la instalación, vaya al directorio donde se encontraba la aplicación TUSTOOL y borre los datos que no se hayan eliminado.

Para desinstalar también MATLAB Runtime, el proceso es idéntico.

CONTACTO

Esta aplicación es parte del Trabajo de Fin de Grado de la alumna Blanca Íñigo Romillo del Grado de Ingeniería Biomédica en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Madrid. Dicho TFG es fruto de una colaboración entre la ETSIT y el Hospital Universitario Ramón y Cajal.

Cualquier referencia que se haga a este trabajo deberá ser debidamente citada.

En caso de incidencia, contactar con:

blanca.inigo.romillo@alumnos.upm.es

5.3. ANEXO III: IMPLEMENTACIÓN DEL CÁLCULO DE MÉTRICAS

En esta sección se muestran las líneas de código de la función *comparation()* que, para cada estructura segmentada y su *gold standard*, calcula el resultado de las métricas definidas en el apartado 3.2.2 y la calificación global del alumno.

1. **Intersección:** Se obtiene como resultado de la operación lógica *AND* entre máscaras.
2. **Unión:** Se obtiene como resultado de la operación lógica *OR* entre máscaras.
3. **Coeficiente DSC:** Se implementa con la fórmula definida en el apartado 3.2.2.

```
%% 3. DICE Coefficient
waitbar(2/6,waitbarC,strcat("DSC Coefficient for ",structName));
dice=2*nnz(intersec) / ...
(nnz(mask_alum)+nnz(mask_ref));
planC{1,4}(i).DSC = dice;
```

Figura 73: *Coeficiente DSC*.

4. **Coeficiente Kappa:** También se basa en la fórmula desarrollada en el apartado 3.2.2.

5. Precisión

```
%% PRECISION
% precision = VP/VP+FP
VP = nnz(mask_ref);
% Intersección entre mask_alum y el negativo de mask_Ref
% (FP)
A = size(mask_ref,1);
B = size(mask_ref,2);
C = size(mask_ref,3);
FP = zeros(A,B,C);
for n = 1:numCortes
    if ~isempty(mask_alum(:,:,n)) && ~isempty(neg_ref(:,:,n))
        FP(:,:,n) = mask_alum(:,:,n) & neg_ref(:,:,n);
    end
end
FP = nnz(FP);
prec = VP/(VP+FP);
```

Figura 74: *Precisión*.

6. Sensibilidad

```
%% SENSITIVITY
% Sensitivity = VP/VP+FN
% FN = intersección entre mask_ref y el negativo de
% mask_alum
A = size(mask_ref,1);
B = size(mask_ref,2);
C = size(mask_ref,3);
FN = zeros(A,B,C);
for o = 1:numCortes
    if ~isempty(mask_ref(:,:,o)) & ~isempty(neg_alum(:,:,o))
        FN(:,:,o) = mask_ref(:,:,o) & neg_alum(:,:,o);
    end
end
FN = nnz(FN);
sens = VP/(VP+FN);
```

Figura 75: *Sensibilidad*.

7. Similitud

```
%% SIMILARITY
waitbar(4/6,waitbarC,strcat("Similarity for ",structName));
frac = sqrt((1-prec)^2+(1-sens)^2);
simil = 1 - (frac/sqrt(2));
planC{1,4}{i}.similarity= simil;
```

Figura 76: *Similitud.*

8. IoU

```
%% IoU
waitbar(5/6,waitbarC,strcat("IoU for ",structName));
% IoU = VP/(VP+FP+FN);
IoU_coef = VP/(VP+FP+FN);
planC{1,4}{i}.IoU= IoU_coef;
```

Figura 77: *Coeficiente IoU.*

9. Calificación

```
%% FINAL CALIFICATION
cal = (k_met*4.5)+(dice*4.5)+(simil*0.5)+(IoU_coef*0.5);
planC{1,4}{i}.calification = cal;
close(waitbarC);
```

Figura 78: *Calificación.*

5.4. ANEXO VI: Aspectos socio-económicos, ambientales y éticos

1. Introducción

En este anexo se describirán los posibles impactos sociales, económicos, medioambientales y éticos resultantes de la implantación de la aplicación desarrollada en este TFG.

El entorno de aplicación de la herramienta desarrollada es el sector sanitario, mientras que el sector responsable de su implementación es el tecnológico. Por ello, ambos entornos se verán afectados por la integración de la aplicación. Además, la herramienta *TUSTOOL* surge como respuesta ante la necesidad de mejorar el plan formativo de los residentes en el área de oncología radioterápica del Hospital Universitario Ramón y Cajal. Por tanto, el primer análisis de impactos se realizará en este escenario.

2. Impacto social

El ámbito social será el que se vea más afectado por la implantación de *TUSTOOL* ya que se trata de una plataforma de soporte a la formación de los médicos residentes que influirá no solo en los residentes y su capacidad de segmentación tumoral sino que también cambiará la forma en que los especialistas evalúan dichas capacidades. Además, indirectamente, la aplicación *TUSTOOL* tiene como último fin mejorar el nivel de vida de los pacientes oncológicos, ofreciéndoles el mejor plan de tratamiento radioterápico posible adecuado a su caso médico que sea eficaz y reduzca los efectos secundarios.

Después de la cirugía, la radioterapia es el tratamiento más importante frente a la lucha contra el cáncer. Como se ha comentado en el apartado 1.1, la planificación del tratamiento radioterápico es una tarea que requiere tiempo y mucha precisión. Cuanto mayor sea la experiencia del oncólogo radioterapeuta, más se reducirá el tiempo de contorneo y más exacta será la delimitación de la lesión. La herramienta propuesta proporciona un método de enseñanza para médicos residentes basado en la práctica de segmentación tumoral en casos reales de pacientes oncológicos y en la evaluación de los resultados por comparación con unos *gold standards* preestablecidos.

Por otro lado, la situación actual causada por el virus SARS-COV-2 ha puesto de manifiesto la necesidad de integrar las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) en el sector sanitario así como la importancia de contar con métodos de enseñanza telemáticos que aseguren la continuidad del plan formativo de los médicos residentes en casos como este. La posibilidad de crear un repositorio de casos escalable hace posible que los médicos residentes siempre cuenten con casos médicos con los que trabajar, incluso aunque en ese momento no se estén haciendo nuevos estudios de pacientes oncológicos, como ocurría cuando la mayor parte de las estancias hospitalarias estaban reservadas para infectados por la COVID-19. La aplicación *TUSTOOL* permitirá que los médicos residentes sigan ganando soltura en la delimitación tumoral desde sus casas, con lo que se evitan desplazamientos innecesarios al hospital y, por tanto, se reducirá el número de personas que se encuentren en el hospital, descongestionando sus instalaciones.

Por último, este TFG ha supuesto también un impacto a nivel personal puesto que me ha permitido poner en práctica los conocimientos adquiridos durante el grado y ver el papel

que puede tener un ingeniero biomédico en el sector hospitalario y cómo puede tanto ayudar en cierta medida a los sanitarios en el desempeño de su trabajo como mejorar la calidad de vida de las personas.

3. Impacto económico

En cuanto al aspecto económico, hay que tener en cuenta que la instalación y mantenimiento de la aplicación en los ordenadores del personal sanitario conlleva unos costes del personal encargado de hacerlo.

Por otra parte, la utilización de esta herramienta, a largo plazo, supondrá reducciones de gastos asociados a varios aspectos:

- La formación de los médicos residentes.

Gracias a *TUSTOOL*, los médicos residentes tendrán acceso a casos muy diversos independientemente del número de pacientes oncológicos del centro en cuestión. De esta forma, se podrían reducir los costes asociados a cursos o clases magistrales de expertos de otros centros para la enseñanza de residentes en segmentación tumoral.

- Por otro lado, se reduciría el tiempo que los oncólogos radioterapeutas dedican a la evaluación de sus alumnos en delimitación de estructuras anatómicas, ahorrando tiempo y carga de trabajo a los especialistas.
- Así mismo, a más largo plazo, la mejora en la formación de futuros oncólogos radioterapeutas que implica esta nueva herramienta, resultará en generaciones de médicos más preparados y tratamientos radioterápicos más precisos y menos dañinos. Por consiguiente, se reduciría el número de pacientes con efectos secundarios y, en consecuencia, el número de ingresos hospitalarios, lo que supone un menor gasto sanitario.

4. Impacto medioambiental

Este TFG no influye de forma significativa sobre el medioambiente y, en cualquier caso, no supone efectos negativos sobre el mismo. El único impacto ambiental que cabe destacar es el consumo energético de los sistemas electrónicos requeridos para su desarrollo. Por ello, se puede asegurar que se trata de un proyecto de desarrollo sostenible, que no deja huella negativa a nivel medioambiental.

5. Responsabilidad ética y profesional

Las responsabilidades éticas de este proyecto están directamente relacionadas con la protección de datos de los pacientes que participan en el trabajo o en futuros proyectos que puedan derivar del mismo.

Para llevar a cabo el desarrollo de la herramienta *TUSTOOL* y poder emplear casos de estudio de pacientes reales, ha sido necesario solicitar la aprobación del Comité Ético de Investigación Clínica (CEIC) del Hospital Universitario Ramón y Cajal. En esta solicitud al CEIC, el grupo de investigación que ha hecho posible este trabajo se compromete a respetar las normas éticas aplicables a este tipo de estudios y a proteger los datos de carácter personal de los pacientes implicados (mediante la anonimización de los casos previa a su uso).

Este TFG garantiza la confidencialidad y seguridad de los datos presentes en el estudio, cumpliendo así con lo establecido en la *Ley Orgánica 3/2018, de 5 de Diciembre, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales* [27]. Además, se respetan los derechos de propiedad intelectual, haciendo referencia a los autores de trabajos previos y empleando herramientas de desarrollo con licencias activas.

6. **Conclusiones** En definitiva, el desarrollo de este proyecto busca impulsar la formación de médicos residentes en el área de planificación radioterápica y lo hará de manera que los ámbitos social, económico, medioambiental, ético y profesional se vean afectados positivamente. En concreto, este proyecto conducirá a una mejora en la calidad de vida de los pacientes oncológicos, así como del personal médico del hospital y de la sociedad en su conjunto.

5.5. ANEXO V: Presupuesto económico

En este anexo se analizarán los gastos económicos que derivan de este Trabajo de Fin de Grado, teniendo en cuenta los costes de las tecnologías empleadas, del personal implicado en su desarrollo y otros costes externos como los impuestos. El coste final asciende a **12.143,77 €**.

En primer lugar, se presenta el **coste de recursos humanos**, teniendo en cuenta las horas dedicadas al desarrollo de este proyecto.

Horas	Precio por hora	Total
400	15 €	6.000 €

En segundo lugar, ha de considerarse también el **coste de recursos materiales**, para lo cual se tendrá en cuenta el coste de los equipos y programas informáticos empleados en el desarrollo del proyecto. La aplicación desarrollada se ha implementado en el entorno MATLAB. Para la comunidad de estudiantes, la licencia de este software es gratuita. Sin embargo, debe quedar plasmado también los costes de las licencias necesarias y los complementos empleados.

Recurso material	Precio	Uso en meses	Amortización en años	Coste
Ordenador portátil	1.169 €	10	4	244 €
MATLAB	69 €	10	1	58 €
MATLAB Compiler	4.440 €	1	1	370 €
Paquete Office	149 €	10	2	62 €
Total				733 €

Para el cómputo total del presupuesto, se tendrán en cuenta los costes indirectos, el beneficio industrial e impuestos.

COSTES DIRECTOS			6.733 €
GASTOS GENERALES (COSTES INDIRECTOS)	15 %	Sobre CD	1.009,95 €
BENEFICIO INDUSTRIAL	6 %	Sobre CD+CI	464,58 €
SUBTOTAL PRESUPUESTO			8207,53 €
IVA APPLICABLE (21 %)			1723,58 €
TOTAL PRESUPUESTO			9931,11 €