

# Resumen

El dolor lumbar es una afección común que afecta a casi el 70% de la población, representando una carga significativa para el sistema de atención médica. Esta tesis se centra en extraer conocimiento médico a partir de Imágenes de Resonancia Magnética (IRM) lumbar, relacionándolas con el dolor lumbar. A través de las técnicas de aprendizaje automático (*Machine Learning*), se procesan extensos conjuntos de datos de IRM lumbar para desarrollar algoritmos de segmentación semántica que identifican las estructuras en la columna vertebral. El objetivo principal es mejorar la comprensión de las causas del dolor lumbar y desarrollar modelos predictivos que respalden una toma de decisiones clínicas más precisa. Simultáneamente, se busca crear un repositorio público de imágenes de columna lumbar anonimizadas y datos poblacionales para facilitar la colaboración en la investigación en este campo.

Los métodos propuestos en esta tesis se centran en el análisis preciso de IRM lumbar de pacientes con antecedentes de dolor lumbar en hospitales públicos de la Comunidad Valenciana, generando dos conjuntos de datos significativos. El primero, llamado “*Massive Image Data Anatomy of the Spine*” (MIDAS), contiene datos de alrededor de 23,688 pacientes, equivalente a unas 124,800 IRM lumbar. Estos datos fueron recopilados de 17 departamentos de salud y sometidos a diversas fases, que incluyen la aprobación de un comité ético, la de-identificación y corrección de metadatos DICOM, y la estandarización de protocolos de adquisición. Además, se implementó una estructura de archivos estandarizada llamada “*Medical Imaging Data Structure*” (MIDS) para garantizar la transparencia y reproducibilidad de los datos.

---

Este conjunto de datos está disponible para descarga bajo solicitud en <https://bimcv.cipf.es/bimcv-projects/midas-2/>.

El segundo conjunto de datos se creó mediante la segmentación manual de 181 IRM lumbar, realizada por dos radiólogos expertos. El propósito de esta tarea fue asignar etiquetas de clase a cada píxel de las imágenes, donde las clases se definieron según elementos anatómicos como vértebras, discos intervertebrales, nervios, vasos sanguíneos y otros tejidos, cubriendo un total de 11 elementos diferentes de la columna vertebral. Estos datos se utilizaron para diseñar y entrenar variantes de arquitecturas de Redes Neuronales Convolucionales (*Convolutional Neural Networks* o CNN) para la tarea de segmentación automática de IRM lumbar.

Entre los experimentos llevados a cabo se destacan:

i) Clasificación de regiones anatómicas en imágenes médicas, una tarea esencial en la creación del conjunto de datos MIDAS. Esto se debe a que, en ocasiones, los metadatos en las imágenes clínicas contienen información incorrecta sobre la modalidad y la ubicación del cuerpo examinado. Para abordar este desafío, se aplicaron técnicas de "aprendizaje profundo" (*Deep Learning* o DL) con el fin de identificar y etiquetar correctamente la región anatómica a la que pertenecía cada imagen. ii) Análisis de distintos enfoques de preprocesamiento para abordar la diversidad de protocolos de adquisición y el ruido en los datos de IRM lumbar. Se desarrolló un enfoque multimodal que utiliza únicamente el registro de las secuencias de IRM en  $T2w$  y  $T1w$  para mitigar el sesgo en los conjuntos de datos. iii) Segmentación semántica de estructuras y tejidos en la región lumbar mediante CNN. Se abordó la segmentación de 12 clases, incluyendo 11 clases que representan estructuras anatómicas específicas y una clase de fondo. Las redes propuestas se basaron en la arquitectura U-Net, pero se diferenciaron en la incorporación de bloques complementarios, como bloques convolucionales, modelos de atención espacial, supervisión profunda y un extractor de características multinivel. Este documento detalla las topologías usadas y analiza los resultados de diferentes diseños de redes para lograr una segmentación más precisa. Varios de estos diseños superaron al modelo U-Net estándar, especialmente cuando se aplicaron estrategias de *Ensemble* que combinaron salidas de múltiples redes, logrando una precisión en la métrica de Intersección sobre Unión (IoU) superior al 80% en la segmentación de 8 de las 11 estructuras de interés en las IRM lumbar. iv) Se evaluó la robustez del modelo de segmentación óptimo entrenado con datos de MIDAS en conjuntos de datos externos. Este modelo mostró eficacia en la segmentación de IRM lumbar en vista axial, indicando su versatilidad para diferentes contextos de

---

segmentación y reduciendo la necesidad de entrenar modelos específicos para cada situación.

Como resultado de los experimentos esta tesis hace hincapié en la importancia de recopilar y preprocesar datos de alta calidad, así como elegir estratégicamente arquitecturas de red y técnicas de DL en la segmentación semántica de imágenes médicas. Presenta topologías de red efectivas que superan al modelo U-Net estándar y resalta la versatilidad de un solo modelo para segmentar imágenes de diferentes protocolos y vistas, simplificando el desarrollo de sistemas de procesamiento de imágenes médicas.

El conjunto de datos MIDAS y los buenos resultados conseguidos de los modelos de CNN en la segmentación semántica de IRM lumbar tienen un potencial transformador en el diagnóstico clínico y la investigación médica. Más allá de su contribución científica, esta tesis enriquece activamente a la comunidad científica a través de publicaciones en revistas especializadas y presentaciones en congresos. A modo de ejemplo, la tesis ha aportado elementos significativos al análisis de IRM lumbar, como se detalla a continuación:

En primer lugar, el conjunto de datos MIDAS se ha incorporado al “Proyecto de Medicina Personalizada Big Data”, una iniciativa conjunta de la “Conselleria de Sanidad Universal y Salud Pública de la Generalitat Valenciana” y el “Servicio Canario de la Salud”. Este proyecto incorpora un caso de uso en el ámbito de la patología lumbar, cuyo objetivo principal es generar informes automatizados capaces de identificar factores de riesgo relacionados con la cronicidad en el dolor lumbar y proporcionar recomendaciones más precisas para respaldar la toma de decisiones clínicas. El propósito subyacente es mejorar la calidad de la atención médica y la eficiencia en la gestión de esta afección común.

En segundo lugar, las segmentaciones automáticas de imágenes médicas tienen la capacidad de transformarse en modelos tridimensionales, lo que resulta altamente beneficioso para su aplicación en impresiones 3D o en entornos de realidad virtual y aumentada. El proyecto MIDAS presentó una aplicación práctica de esta idea en un caso de cirugía de escoliosis idiopática durante el XVI Congreso Nacional de la Sociedad Española de Investigación en Cirugía Ortopédica y Traumatología (INVESCOT), titulado “Realidad virtual aumentada como asistencia en la cirugía de escoliosis idiopática”. Este trabajo presentó un modelo de apoyo que facilitó la planificación preoperatoria y asistió en la corrección de la deformidad vertebral en un caso clínico real. Estos modelos pueden ayudar a los cirujanos a comprender mejor la anatomía tridimensional, reducir los riesgos de lesiones durante la cirugía y mejorar la colocación de la instrumentación correctiva.

---

En última instancia, esta tesis representa un viaje interdisciplinario desde la ingeniería hasta la medicina, destacando la innovación de aplicar métodos de ML para obtener conjuntos de datos médicos etiquetados a gran escala. Las futuras investigaciones se centran en mejorar el conjunto de datos y desarrollar herramientas de visión por computadora para detectar y clasificar patologías de la columna lumbar. Una vez validadas clínicamente, estas innovaciones podrían revolucionar el diagnóstico clínico y la toma de decisiones médicas basadas en evidencia en este campo.