



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS ESPECÍFICAS DE LA
TELECOMUNICACIÓN
MENCIÓN EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS

**Machine Learning Aplicado a la Neurocirugía:
Análisis del Estado del Arte.
Diseño y Desarrollo de Aplicación Móvil Basada en
Machine Learning.**

Autor:
Víctor Gonzalo Núñez

Tutor:
Isabel de la Torre Díez

Valladolid, 15 de junio de 2025

TÍTULO:	Machine Learning Aplicado a la Neurocirugía: Análisis del Estado del Arte. Diseño y Desarrollo de Aplicación Móvil Basada en Machine Learning.
AUTOR:	Víctor Gonzalo Núñez
TUTOR:	Isabel de la Torre Díez
DEPARTAMENTO:	Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática

TRIBUNAL

PRESIDENTE:	Salvador Dueñas Carazo
VOCAL:	Beatriz Sainz de Abajo
SECRETARIO:	Isabel de la Torre Díez
SUPLENTE 1:	Jesús Poza Crespo
SUPLENTE 2:	David González Ortega

FECHA:

CALIFICACIÓN:

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) se enfoca en el análisis del estado del arte del Machine Learning (ML) aplicado a la neurocirugía, que es una de las partes más complejas de la medicina. Debido a la gran dificultad que existe a la hora de realizar los diagnósticos y en los tratamientos de esta área, hay una gran necesidad de herramientas tecnológicas que puedan ayudar a conseguir una mayor precisión y aumentar la eficiencia.

El ML aparece como una de estas posibles soluciones demostrando tener el potencial para transformar la neurocirugía mejorando tanto el diagnóstico como los tratamientos de los pacientes, siendo capaz de predecir las posibles complicaciones que puedan aparecer en este proceso.

En este TFG se busca proporcionar una visión general de los avances recientes, aplicaciones prácticas y desafíos pendientes en el uso de ML en neurocirugía mediante un estudio de la literatura que existe actualmente.

Por otro lado, se pretende demostrar que es posible desarrollar una aplicación móvil que utilice modelos de ML para ayudar a tomar decisiones clínicas en pacientes con traumatismo craneoencefálico.

Objetivos y métodos

Los principales objetivos de este TFG son analizar el uso actual del ML en la neurocirugía y sus aplicaciones y avances, y desarrollar una aplicación que utilice el ML para predecir resultados en casos de pacientes con traumatismo.

La revisión de literatura se ha llevado a cabo siguiendo el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), metodología que incluye cuatro fases principales:

- **Identificación:** Búsqueda algunas bases de datos académicas. En este caso se han seleccionado Google Scholar, PubMed, ScienceDirect, Web of Science e IEEE Xplore.
- **Selección:** Se filtran los estudios más relevantes aplicando criterios de inclusión y exclusión. Para este estudio sólo se han tenido en cuenta artículos de investigación y revisiones publicados en los últimos diez años y en inglés o español.
- **Elegibilidad:** Se valora la importancia de los estudios seleccionados mediante una lectura completa.

- **Inclusión:** Se incluyen en la revisión final únicamente los estudios que cumplen con todos los criterios de elegibilidad.

La aplicación para móvil se ha desarrollado en Android Studio y se ha basado en Java. Se ha utilizado el framework TensorFlow para poder ejecutar los modelos ya entrenados directamente desde el dispositivo. Estos modelos han sido entrenados en la plataforma web Google Colab, que está basada en Jupyter Notebooks.

Resultados

De un total de 12186 artículos que aparecieron en la búsqueda inicial, solo 29 publicaciones han sido seleccionadas después de aplicar el protocolo PRISMA. Los resultados muestran un gran crecimiento del interés académico por el ML en neurocirugía especialmente en los últimos tres años. Se ha podido ver que las aplicaciones que más interesan son la predicción de resultados postoperatorios, el uso de imágenes hiperespectrales para ayudar a identificar diferentes tejidos y la asistencia durante cirugías con herramientas basadas en ML. Las bases de datos que han tenido mejor proporción de resultados relevantes han sido ScienceDirect y Web of Science.

La aplicación que se ha desarrollado ha conseguido predecir de una manera adecuada el riesgo de mortalidad y la necesidad de intervención quirúrgica. Gracias a este tipo de aplicaciones, los profesionales podrían tomar mejores decisiones, lo que significaría una gran mejora en los resultados de los pacientes.

Conclusiones

Tras el análisis de los artículos seleccionados se aprecia el crecimiento del interés del Machine Learning en la neurocirugía. Los progresos que han surgido en esta área han llegado a demostrar que el ML puede mejorar la exactitud en los diagnósticos, adaptar los tratamientos a cada paciente y predecir resultados. Esto puede hacer que se consiga gestionar mejor a los pacientes y mejorar sus resultados clínicos. Sin embargo, también se han encontrado desafíos técnicos y éticos que deben tenerse en cuenta para poder implementar estas tecnologías de una manera totalmente segura. Las investigaciones que se realicen en el futuro en este campo deberían centrarse en validar nuevas aplicaciones de ML y en superar todos esos obstáculos. Así será posible alcanzar todo el potencial de esta tecnología dentro de la neurocirugía.

Con el desarrollo de la aplicación se ha demostrado que disponiendo de los suficientes datos clínicos que estén recogidos concretamente para predecir la evolución de las lesiones o enfermedades y con un entrenamiento adecuado, este tipo de herramientas puede ayudar en el diagnóstico, abriendo la puerta a un uso más extendido de estos sistemas en entornos hospitalarios.

Índice general

1. Introducción.....	11
1.1. Contextualización	11
1.2. Terminología.....	11
1.2.1. Neurocirugía.....	11
1.2.2. Inteligencia Artificial	12
1.2.3. Machine Learning	12
1.3. Relevancia del Machine Learning en Neurocirugía.....	13
1.4. Objetivo	13
2. Metodología.....	15
3. Resultados.....	19
3.1. Resultados iniciales.....	19
3.1.1. Resultados por año de publicación:.....	19
3.1.2. Resultados por base de datos:	20
3.2. Resultados seleccionados.....	24
3.2.1. Resultados por año de publicación:.....	24
3.2.2. Resultados por base de datos:	25
3.3. Publicaciones seleccionadas	26
3.3.1. Resúmenes.....	26
3.3.2. Análisis de resultados.....	37
4. Desarrollo de aplicación móvil: NeuroML.....	42
4.1.1. Sistema Operativo y entorno de desarrollo	42
4.1.2. Funcionalidades.....	42
4.1.3. Entrenamiento de modelos	43
4.1.4. Resultado.....	44
4.1.5. Limitaciones	50

4.1.6. Próximos pasos.....	51
4.1.7. Conclusiones	52
5. Discusión	54
6. Conclusiones.....	57
7. Bibliografía.....	60

Índice de Tablas

Tabla 1 - Resultados iniciales por año de publicación	19
Tabla 2 - Resultados iniciales por motor de búsqueda	20
Tabla 3 - Resultados seleccionados por año de publicación	24
Tabla 4 - Resultados seleccionados por motor de búsqueda	25

Índice de figuras

Figura 1 - Diagrama de flujo fase de identificación	17
Figura 2 - Diagrama de flujo protocolo PRISMA	18
Figura 3 - Gráfico de resultados iniciales por año de publicación	20
Figura 4 - Gráfico de porcentaje de resultados iniciales por motor de búsqueda.....	21
Figura 5 - Gráfico de resultados iniciales por año en Google Scholar.....	21
Figura 6 - Gráfico de resultados iniciales por año en PubMed	22
Figura 7 - Gráfico de resultados iniciales por año en Science Direct.....	22
Figura 8 - Gráfico de resultados iniciales por año en Web of Science.....	23
Figura 9 - Gráfico de resultados iniciales por año en IEEE Xplore	23
Figura 10 - Gráfico de resultados seleccionados por año de publicación	25
Figura 11 - Gráfico de resultados seleccionados por motor de búsqueda	25
Figura 12 – Pantalla principal de la aplicación.....	44
Figura 13 - Formulario del "Quick Test".....	45
Figura 14 - Resultado del "Quick Test".....	46
Figura 15 - Selector del "Complete Test".....	47
Figura 16 – Pantallas de selector y opciones de paciente.....	48
Figura 17 - Formulario de paciente	49
Figura 18 - Resultado del" Complete Test"	50
Figura 19 - Porcentaje de resultados por motor de búsqueda.....	55

1. Introducción

1.1. Contextualización

La neurocirugía es la parte de la medicina que aborda las enfermedades que afectan tanto al cerebro como a la médula espinal y los nervios periféricos. A pesar de todos los avances que ha habido tanto en el diagnóstico como en las técnicas quirúrgicas sigue siendo una de las áreas más complicadas de la medicina, especialmente por la precisión que se necesita y las consecuencias que tiene cada decisión.

Este campo es tan complejo que, a pesar de que las técnicas que se utilizan en las cirugías y los resultados del paciente han evolucionado de manera considerable en los últimos años gracias al gran avance de la tecnología, aún existen muchas dificultades que hay que tener en cuenta, destacando el ubicar de manera precisa las lesiones, las planificaciones previas a las cirugías y la predicción de los resultados posteriores.

Para intentar salvar estos obstáculos se han empezado a integrar tecnologías como la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático (machine learning, ML) con la idea de transformar la neurocirugía totalmente.

El ML es una parte de la IA que pretende que un sistema sea capaz de aprender de los datos introducidos mediante algoritmos. La idea es conseguir hacer predicciones o tomar decisiones sin que tengan que ser programados para cada tarea en concreto. Gracias a esto se pueden analizar una gran cantidad de datos médicos buscando patrones que una persona podría pasar por alto. Con la implementación de estos sistemas se busca mejorar la precisión de los diagnósticos, personalizar de mejor manera los tratamientos y predecir resultados.

1.2. Terminología

1.2.1. Neurocirugía

La neurocirugía es una especialidad médica que se encarga del diagnóstico, tratamiento y manejo quirúrgico de los trastornos que afectan el sistema nervioso, incluyendo el cerebro, la médula espinal y los nervios periféricos. Esto abarca una gran cantidad de condiciones neurológicas como tumores cerebrales, aneurismas,

malformaciones vasculares, lesiones traumáticas, enfermedades degenerativas de la columna vertebral y trastornos del movimiento [1].

El objetivo principal de la neurocirugía es mejorar la calidad de vida de los pacientes. Esto se hace mediante intervenciones para aliviar el dolor, restaurar la función neurológica y evitar el avance de enfermedades neurológicas. Utiliza para ello tecnologías avanzadas para planificar y llevar a cabo procedimientos quirúrgicos con precisión.

Los neurocirujanos necesitan una formación continua además de colaborar con especialistas de otras disciplinas médicas para proporcionar un cuidado completo a los pacientes [1].

1.2.2. Inteligencia Artificial

La inteligencia artificial (IA) puede entenderse como un conjunto de técnicas que permite a los sistemas informáticos imitar algunos aspectos del razonamiento humano. En medicina la idea sería que estos sistemas tengan la capacidad de analizar información compleja, reconocer patrones clínicos y ayudar a tomar decisiones.

Existen varios tipos de inteligencia artificial, los cuales son, según Stuart J. Russell y Peter Norvig, los siguientes [2]:

Sistemas que piensan como humanos: Replican procesos de pensamiento humano, como la toma de decisiones y la resolución de problemas.

Sistemas que actúan como humanos: Simulan como se comportaría un humano en diferentes situaciones.

Sistemas que piensan racionalmente: Utilizan modelos matemáticos para imitar el pensamiento racional.

Sistemas que actúan racionalmente: Actúan de la manera más óptima para conseguir objetivos específicos.

1.2.3. Machine Learning

El Machine Learning (ML) es una rama de la IA que se basa en crear algoritmos capaces de aprender a partir de datos. Cuando detectan patrones repetitivos y relaciones importantes en la información estos sistemas ajustan su comportamiento en lugar de seguir instrucciones fijas, sin ser necesario que intervenga una persona. Esto se basa en la idea de que los sistemas pueden mejorar su rendimiento en una tarea específica a medida que son expuestos a más datos y ejemplos.

El aprendizaje automático se clasifica generalmente en cuatro tipos principales [3]:

Supervisado: El sistema es capaz de aprender en base a un conjunto de datos etiquetados, con una salida que esté claramente definida.

No supervisado: El sistema busca patrones y relaciones en los datos sin que se hayan definido salidas concretas.

Semisupervisado: El sistema utiliza conjuntos de datos tanto etiquetados como no etiquetados para conseguir entrenar algoritmos.

Aprendizaje por refuerzo: El sistema es capaz de aprender mediante prueba y error. Aprende a partir de señales positivas o negativas según las decisiones que tome.

1.3. Relevancia del Machine Learning en Neurocirugía

El uso de ML en neurocirugía ha crecido exponencialmente en los últimos años mediante diferentes aplicaciones en la planificación quirúrgica, la monitorización durante las operaciones y la rehabilitación postoperatoria. Los sistemas de ML, mediante el procesamiento y el análisis de datos complejos de neuroimágenes, son capaces ayudar a los cirujanos a identificar con mayor precisión las zonas que se encuentran afectadas y mejorar los tratamientos. Además de esto, los algoritmos de ML pueden mejorar la precisión y reducir los riesgos que puedan producirse durante o después de las cirugías complicadas gracias a la adaptación a sistemas que pueden guiar a los cirujanos durante ellas.

El ML ha destacado sobre todo en este campo en la predicción de resultados postoperatorios basándose en datos de operaciones anteriores. Esto es algo que puede ayudar a los neurocirujanos a tomar mejores decisiones sobre el tratamiento y a crear planes personalizados, pudiendo conseguir mejorar los resultados y la calidad de vida de los pacientes.

1.4. Objetivo

El objetivo de este análisis es proporcionar una visión general del estado actual del Machine Learning en el campo de la neurocirugía, destacando los avances recientes, las diferentes aplicaciones y los desafíos pendientes. La neurocirugía ha tenido una transformación importante con la incorporación de nuevas tecnologías. Se pretende identificar las áreas donde el ML ha demostrado mejorar los procedimientos y las oportunidades para futuras investigaciones y desarrollos mediante un análisis de la

literatura existente. La idea es entender mejor cómo puede integrarse de manera correcta el ML dentro de la neurocirugía para así contribuir a la mejora de la atención al paciente y al avance de la neurocirugía.

En los siguientes apartados, se va a realizar una revisión del estado del arte identificando los estudios recientes más relevantes y analizando las principales aplicaciones del ML. Tras esto se pretende evaluar el impacto de las aplicaciones de ML en el ámbito de la neurocirugía, teniendo en cuenta aspectos importantes como la precisión en los diagnósticos, la eficiencia en la planificación quirúrgica y la personalización de tratamientos. Por último, se va a desarrollar una aplicación móvil capaz de predecir resultados de pacientes con traumatismo craneoencefálico mediante modelos preentrenados.

En resumen, este TFG intenta documentar los avances y aplicaciones actuales del ML en neurocirugía, además de evaluar su impacto y buscar las futuras direcciones de investigación que puedan continuar desarrollando este campo. Se espera contribuir al entendimiento y desarrollo de estrategias que integren de manera efectiva el ML en la neurocirugía, mejorando así los resultados para los pacientes y optimizando los procesos clínicos.

2. Metodología

Para garantizar una revisión estructurada y transparente de la literatura, se ha adoptado la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). PRISMA es una guía ampliamente reconocida por su utilidad en revisiones sistemáticas. Esta metodología proporciona un enfoque estructurado para la identificación, selección, evaluación y síntesis de estudios relevantes, asegurando que se aborden de manera rigurosa todas las etapas del proceso de revisión.

Esta declaración basa su revisión sistemática en cuatro etapas sobre las que profundizaremos a continuación [4]:

Fase de identificación

En esta primera fase se definen las características y parámetros de la búsqueda de información sobre el tema de estudio.

Lo primero a considerar son los diferentes motores de búsqueda que se van a utilizar. Para esto se han seleccionado cinco bases de datos que cuentan con gran reconocimiento en la comunidad científica y cuentan con la mayor parte del contenido relacionado con el tema de este estudio, lo que las hace adecuadas para esta revisión.

- Google Scholar.
- Pubmed.
- Science Direct.
- Web of Science.
- IEEE Xplore.

Una vez decididos los motores de búsqueda, es necesario utilizar palabras clave que nos permitan realizar una búsqueda apropiada y obtener resultados lo más relevantes posibles.

Para la búsqueda de artículos relacionados con el Machine Learning aplicado a neurocirugía se han utilizado la combinación: (“*machine learning*” *OR* “*AI*”) *AND* “*neurosurgery*”

Solo con esto, los resultados que arroja cada motor es demasiado elevado, por lo que es necesario añadir una serie de filtros para realizar un primer cribado excluyendo aquellos artículos de menor interés.

- Fecha de publicación: Nos interesan los resultados más recientes, por lo que se ha establecido el filtro en los últimos diez años (2014-actualidad).
- Idioma: Se seleccionan únicamente los idiomas inglés y español
- Tipo de resultado: Se excluyen todos los resultados que no sean artículos de investigación o de revisión sistemática por ser los más completos.

Finalmente, una vez obtenidos los resultados de la búsqueda se aplica un primer descarte basándonos en la relación que pueda tener el título con el tema de estudio.

Todo este proceso se puede apreciar resumido en el siguiente diagrama de flujo:

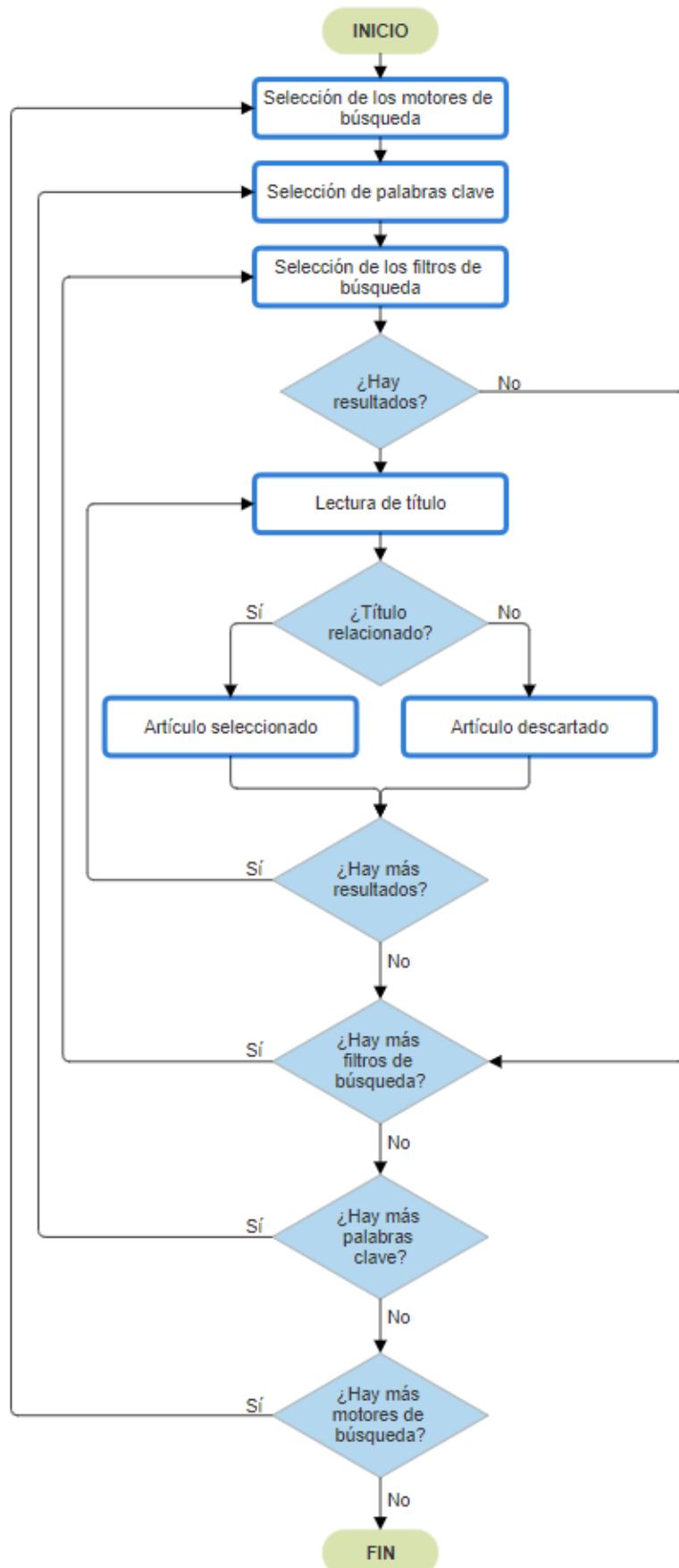


Figura 1 - Diagrama de flujo fase de identificación

Fase de selección:

Los resultados de la búsqueda inicial se someten a un proceso de selección para identificar estudios potencialmente elegibles. En esta fase se van a eliminar inicialmente los duplicados y se va a realizar una revisión de títulos y resúmenes. Los estudios que no cumplen con los criterios de inclusión son excluidos en esta etapa.

Fase de elegibilidad:

Los estudios preseleccionados pasan por una evaluación más detallada mediante la lectura completa del texto. De nuevo, se descartarán todos aquellos estudios que no resulten de interés de cara a este análisis.

Fase de inclusión:

Los estudios que hayan cumplido con todos los criterios de elegibilidad se incluyen en la revisión sistemática.

Todas lo anterior queda sintetizado en un diagrama de flujo con los datos de los resultados de la búsqueda que se han ido avanzando en cada una de las fases del protocolo PRISMA.

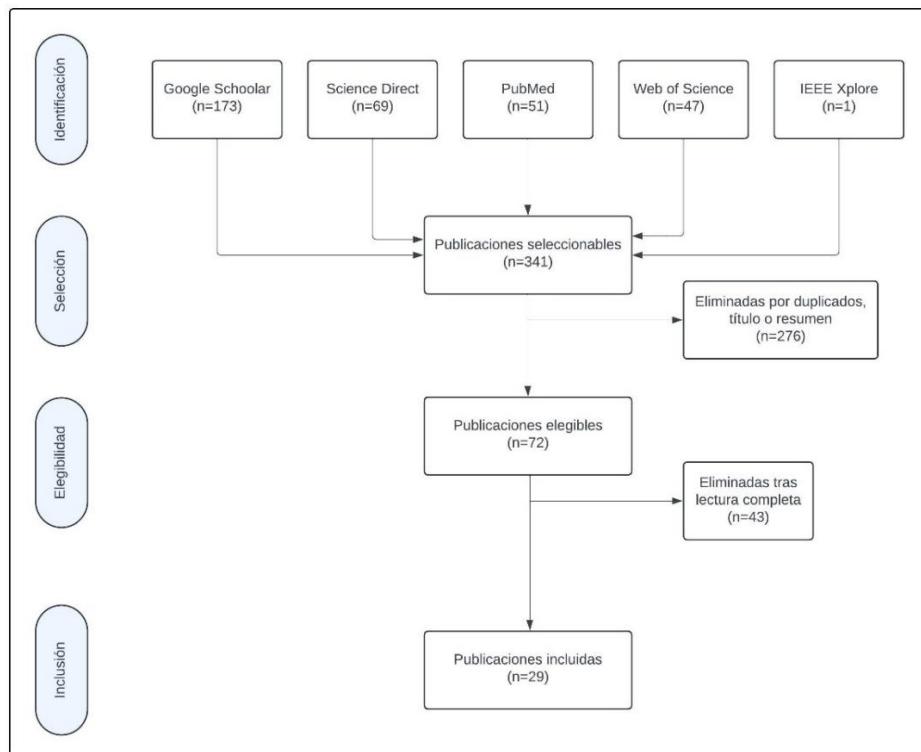


Figura 2 - Diagrama de flujo protocolo PRISMA

3. Resultados

En este punto se van a tratar los resultados que se han obtenido tras la aplicación del protocolo PRISMA en la búsqueda de documentos relacionados con el ML aplicado a la neurocirugía. El objetivo principal de este análisis es evaluar y sintetizar la información que se encuentra disponible en diferentes bases de datos. Esto puede ayudar a entender mejor la evolución y el impacto que ha tenido esta tecnología.

3.1. Resultados iniciales

En la primera fase de la búsqueda se identificaron un total de 9880 artículos distribuidos entre las diferentes bases de datos.

3.1.1. Resultados por año de publicación:

Para ver la evolución en la cantidad de artículos que se han escrito relacionados con el tema del estudio a lo largo de los años se ha generado la siguiente tabla con los resultados por año:

Año	Resultados
2014	197
2015	202
2016	244
2017	370
2018	554
2019	819
2020	1079
2021	1575
2022	2095
2023	2562
2024	2489
Total	12186

Tabla 1 - Resultados iniciales por año de publicación



Figura 3 - Gráfico de resultados iniciales por año de publicación

En la gráfica puede verse un claro incremento en el número de publicaciones en los últimos años. Este aumento puede significar que es un campo de estudio que está ganando importancia y que se espera que continúe creciendo según mejore la tecnología y aparezcan nuevas aplicaciones.

3.1.2. Resultados por base de datos:

A continuación, se presenta una tabla con la cantidad de resultados obtenidos en cada una de las bases de datos:

Motor de búsqueda	Resultados
Google Scholar	8354
PubMed	440
Science Direct	2699
Web of Science	501
IEEE Xplore	192
Total	12186

Tabla 2 - Resultados iniciales por motor de búsqueda

En el siguiente diagrama circular se muestra distribución de los resultados. En él se aprecia que Google Scholar ha sido la fuente con mayor cantidad de artículos encontrados (68% del total), seguido por ScienceDirect con un 22%. Entre estos dos motores de búsqueda le han encontrado el 90% de los resultados totales.

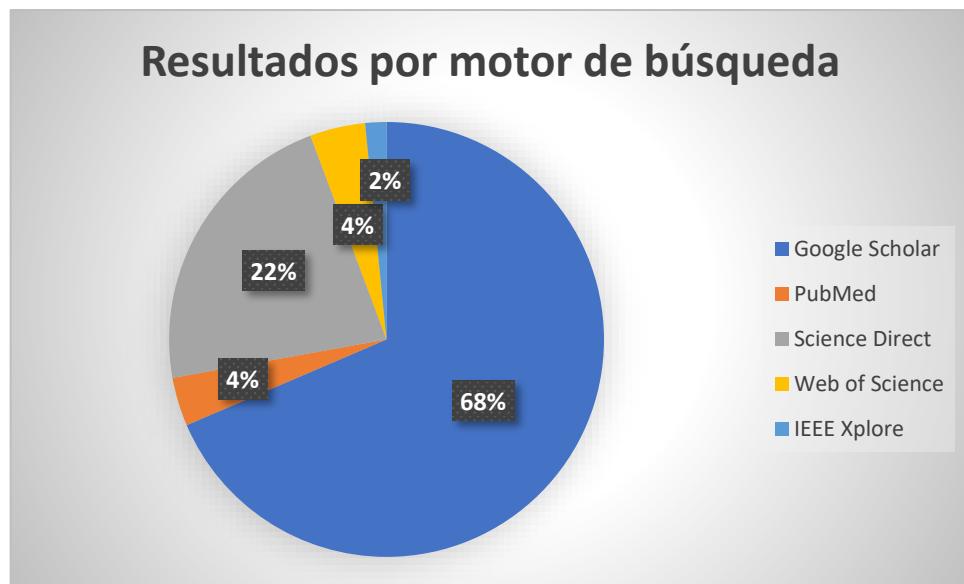


Figura 4 - Gráfico de porcentaje de resultados iniciales por motor de búsqueda

También es interesante comparar los resultados obtenidos por año de publicación en cada buscador.

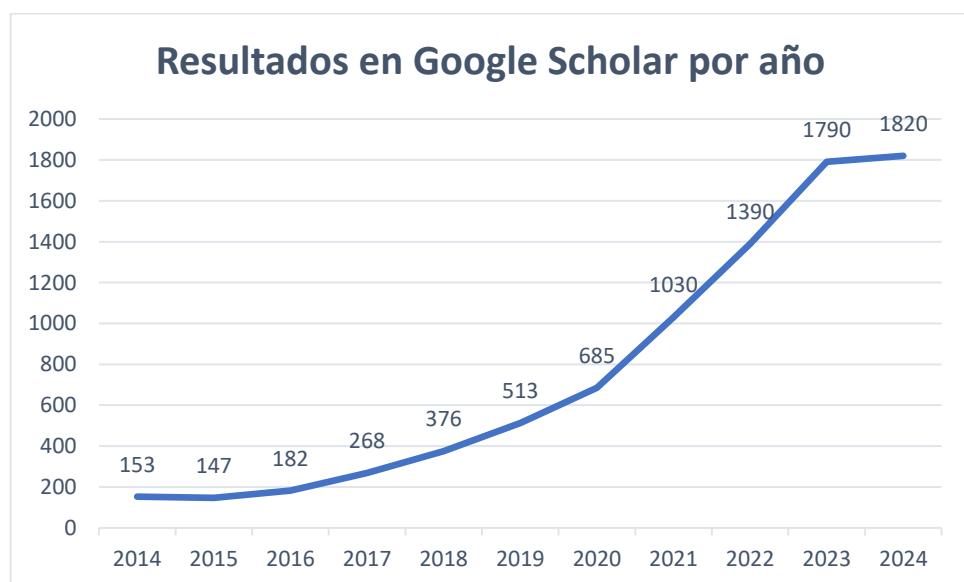


Figura 5 - Gráfico de resultados iniciales por año en Google Scholar

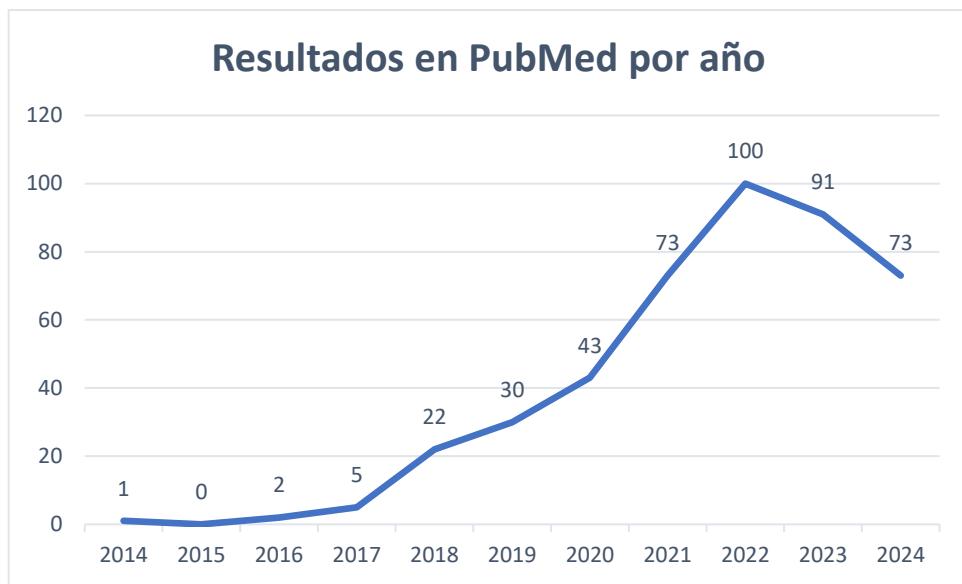


Figura 6 - Gráfico de resultados iniciales por año en PubMed

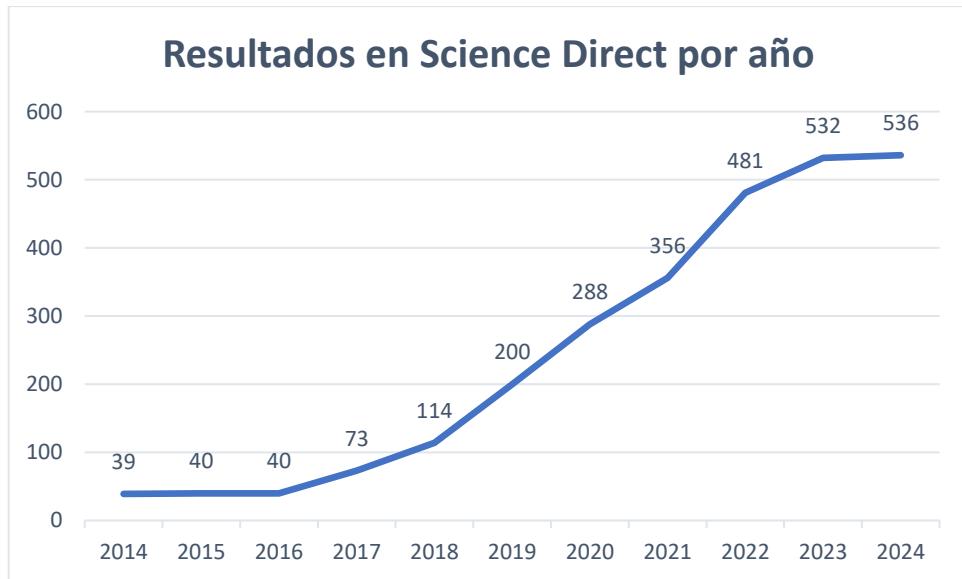


Figura 7 - Gráfico de resultados iniciales por año en Science Direct

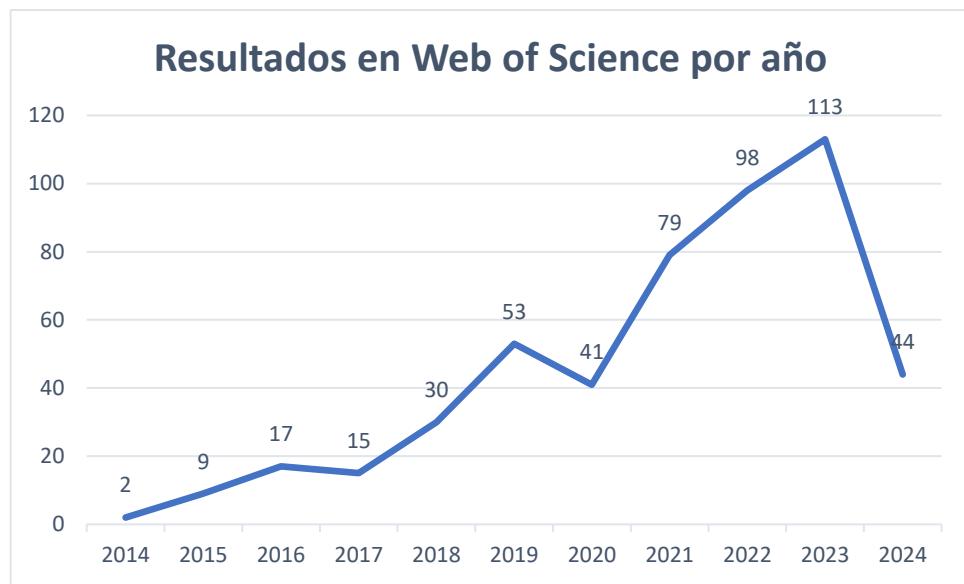


Figura 8 - Gráfico de resultados iniciales por año en Web of Science

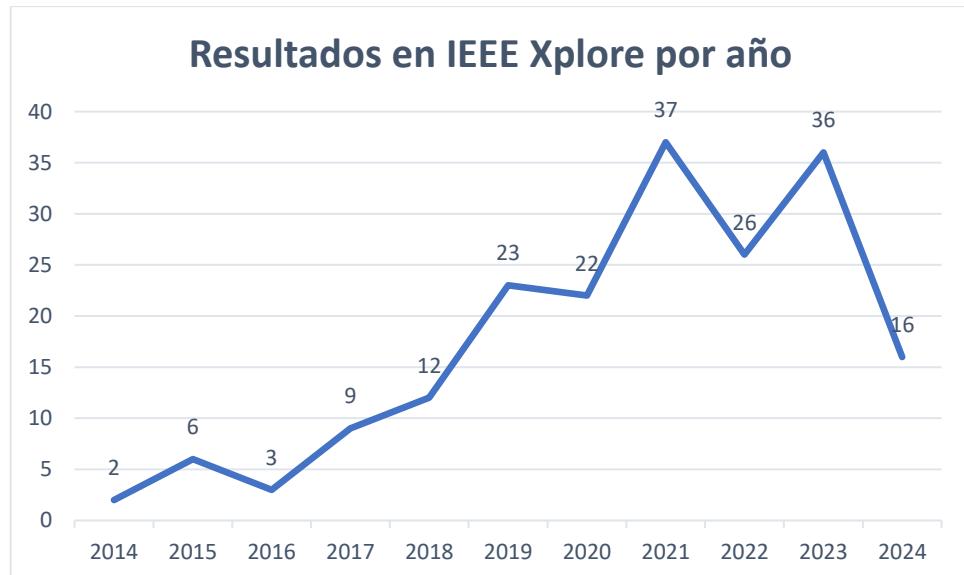


Figura 9 - Gráfico de resultados iniciales por año en IEEE Xplore

A pesar de la gran diferencia en la cantidad de publicaciones encontradas en cada buscador, las curvas que siguen las anteriores gráficas son bastante similares. Esto significa que en cada base de datos la cantidad de publicaciones ha aumentado casi en la misma proporción.

3.2. Resultados seleccionados

Una vez utilizado el protocolo prisma se han seleccionado 29 publicaciones. En base a este resultado se van a realizar las mismas comparaciones que en el apartado anterior.

3.2.1. Resultados por año de publicación:

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por año de publicación para las 29 publicaciones seleccionadas:

Año	Resultados
2014	0
2015	0
2016	0
2017	0
2018	1
2019	1
2020	2
2021	2
2022	8
2023	9
2024	6
Total	29

Tabla 3 - Resultados seleccionados por año de publicación

Al tratarse de una tecnología que ha evolucionado considerablemente los artículos se interés se centran sobre todo en los últimos dos años. Esto puede observarse gráficamente en la siguiente imagen.



Figura 10 - Gráfico de resultados seleccionados por año de publicación

3.2.2. Resultados por base de datos:

A continuación, se presenta una tabla con la cantidad de resultados obtenidos en cada una de las bases de datos y un diagrama circular con los porcentajes:

Motor de búsqueda	Resultados
Google Scholar	7
PubMed	3
Science Direct	10
Web of Science	9
IEEE Xplore	0
Total	29

Tabla 4 - Resultados seleccionados por motor de búsqueda

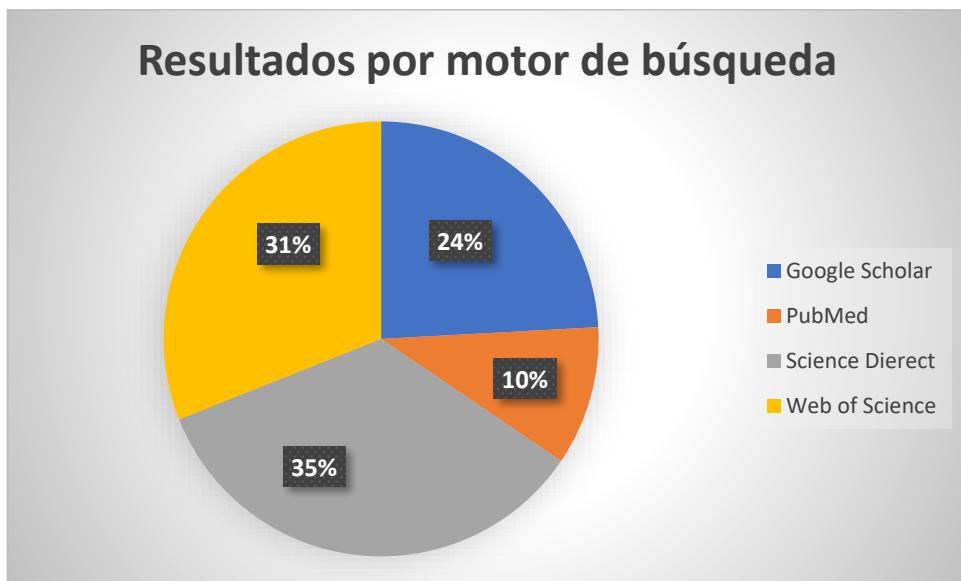


Figura 11 - Gráfico de resultados seleccionados por motor de búsqueda

Si comparamos este gráfico con el previo a la aplicación de PRISMA se aprecia como a pesar de que en el inicial el 68% de los resultados se encontraban en Google Scholar, en este caso, ocupa el tercer lugar con tan solo un 24%.

En esta selección final, tanto ScienceDirect como Web of Science han conseguido una mayor relevancia, lo que indica que las publicaciones más relevantes y con mayor calidad pueden estar más repartidas entre las diferentes bases de datos.

3.3. Publicaciones seleccionadas

3.3.1. Resúmenes

En este apartado se recogen las publicaciones seleccionadas mediante el protocolo prisma con un breve resumen de cada una de ellas.

Artificial Intelligence Applications in Clinical Neurosurgery [5]	
11-2022	Google Scholar
<p>Trata del estado general de la IA en algunas aplicaciones de la neurocirugía clínica.</p> <p>Analiza los avances que ha habido y encuentra algunos riesgos importantes de la implementación de la IA. Algunas especialidades médicas podrían llegar a desaparecer al quedarse anticuadas además de que acostumbrarse al uso de esta tecnología podría generar una dependencia excesiva de ella.</p> <p>Destaca que la supervisión humana es totalmente necesaria para asegurar que la IA se utilice de una manera segura.</p>	

The challenges of deep learning in artificial intelligence and autonomous actions in surgery [6]	
11-2022	Google Scholar
<p>Habla de los desafíos del aprendizaje profundo aplicado en cirugía, basándose en diversos artículos.</p> <p>Destaca los dilemas técnicos, éticos y comerciales que estas tecnologías puedan ser autónomas en las cirugías.</p>	

Encuentra algunos problemas que pueden surgir al implementar esta tecnología en los hospitales, como que los datos utilizados deben ser totalmente fiables y que los algoritmos son complejos y su interpretación por parte de los profesionales puede no ser correcta.

Comparison of Brain Injury Mortality Prediction by Machine Learning Models: logistic regression and support vector machine. Systematic review and meta-analysis [7]

03-2023

Google Scholar

Analiza dos modelos de ML: la regresión logística y la máquina de vectores de soporte. Compara los resultados al predecir la mortalidad debida a lesiones cerebrales provocadas por un traumatismo basándose en cuatro parámetros.

Según este análisis la regresión logística es mejor que la máquina de vectores de soporte en rendimiento y precisión pero peor en sensibilidad y especificidad.

Machine Learning Applications in Spine Surgery [8]

10-2023

Google Scholar

Revisa las aplicaciones que tiene el ML dentro de las cirugías de columna vertebral.

Destaca algunos beneficios que puede tener el ML: mejora en la precisión de los diagnósticos y la planificación de los tratamientos y la posibilidad de predecir complicaciones postoperatorias.

También destaca la necesidad de más investigaciones y validaciones antes de la implementación clínica generalizada.

Advancements and Challenges in the Application of Artificial Intelligence in Surgical Arena: A Literature Review [9]

10-2023

Google Scholar

Revisa los avances y desafíos que puede haber en la aplicación de la IA dentro de la cirugía. Se destaca su potencial para mejorar la planificación

preoperatoria, la guía intraoperatoria y el análisis postoperatorio, lo que puede llevar mejores resultados quirúrgicos.

Explora las consideraciones éticas, legales y regulatorias además de los retos de implementación que deben tenerse en cuenta para integrar de una manera correcta la IA en cirugías.

Revolutionizing Neurosurgery and Neurology: The transformative impact of artificial intelligence in healthcare [10]

01-2024

Google Scholar

Analiza las mejoras que ha habido al integrar la IA en la neurocirugía cerebrovascular. En este campo se centra en mejorar la atención al paciente y mejorar los resultados en lugares con pocos recursos.

Según este análisis los resultados son muy buenos en detección y diagnóstico y también prediciendo la evolución de los pacientes.

Pero para que esto sea posible hay algunas dificultades que se centran en la adquisición de datos y en la validación de los modelos por parte de profesionales.

Artificial Intelligence Innovations in Cerebrovascular Neurosurgery: A Systematic Review of Cutting-edge Applications [11]

06-2024

Google Scholar

Trata los aspectos de la inclusión de la IA en la neurocirugía y la neurología, destacando cómo ha mejorado la atención al paciente, los diagnósticos y las modalidades de tratamiento.

Gracias a la IA, los diagnósticos son más rápidos y se puede ofrecer a los pacientes tratamientos más personalizados.

Los modelos de ML pueden ayudar a los hospitales a gestionar sus recursos prediciendo el avance de las enfermedades.

Además, los robots de asistencia en cirugía evitan muchos de los errores humanos.

A review of robotics in neurorehabilitation: Towards an automated process for upper limb [12]

04-2018	PubMed
Revisa el uso de la robótica en la rehabilitación de las extremidades superiores.	
Estos robots ayudan en las terapias de rehabilitación, lo que mejora el proceso para los pacientes.	
También tiene en cuenta las posibles mejoras que habría al implementar procesos de rehabilitación que sean más autónomos, así como los retos que esto puede plantear.	

Imaging Biomarkers of Glioblastoma Treatment Response: A Systematic Review and Meta-Analysis of Recent Machine Learning Studies [13]	
01-2022	PubMed
Realiza un análisis de la precisión diagnóstica de biomarcadores de la respuesta al tratamiento del glioblastoma basados en ML basándose en estudios recientes.	
Según este análisis, los modelos de ML más precisos al realizar diagnósticos son los que utilizan tecnologías de resonancia magnética para comprobar si el avance es real o no.	
Este estudio encuentra algunas limitaciones como el reducido número de pacientes y el alto riesgo de sesgo. Para evitarlas hace énfasis en la necesidad de mejorar la metodología de los estudios en estos aspectos.	

Machine Learning in Neurosurgery: Toward Complex Inputs, Actionable Predictions, and Generalizable Translations [14]	
01-2024	PubMed
Revisa las aplicaciones del ML dentro de la neurocirugía, destacando su capacidad para predecir diagnósticos y resultados, analizar imágenes y asistir en la navegación robótica.	
Los modelos que analiza necesitan ser validados por profesionales para que su implementación sea segura, por lo que destaca la importancia de que haya neurocirujanos presentes en el desarrollo.	

Application of machine learning to predict the outcome of pediatric traumatic brain injury [15]	
11-2021	ScienceDirect
<p>Describe el uso del ML para predecir los resultados de lesiones cerebrales traumáticas en pacientes pediátricos.</p> <p>Utiliza datos de niños con lesiones cerebrales para desarrollar modelos de ML que sean capaces de predecir resultados clínicos. Estos modelos han conseguido predecir de manera adecuada la evolución de este tipo de pacientes.</p> <p>En pediatría esto podría ser muy útil a la hora de tomar decisiones y también en la planificación de los tratamientos.</p>	

Machine learning-based identification of lower grade glioma stemness subtypes discriminates patient prognosis and drug response [16]	
01-2022	ScienceDirect
Se centra en la identificación de subtipos de glioma de bajo grado utilizando técnicas de ML. Los subtipos identificados ayudan a entender mejor cómo puede evolucionar cada paciente y cómo podría responder a los tratamientos. Gracias a esto se puede predecir de manera precisa la evolución de los pacientes y seguir tratamientos que sean más efectivos, mejorando estos procedimientos.	

The application of navigation system based on augmented reality head-mounted devices in spine surgery [17]	
04-2022	ScienceDirect
<p>Revisa el uso de dispositivos de realidad aumentada sobre la cabeza (ARHMD) en la cirugía de columna.</p> <p>Los dispositivos ARHMD permiten a los cirujanos ver imágenes virtuales superpuestas sobre la anatomía real ayudándoles a mejorar la precisión de diferentes procedimientos.</p> <p>Esta realidad aumentada mejora su precisión mediante ML y, aunque tienen el potencial para reducir los gastos y los tiempos de las cirugías, su</p>	

eficacia aún depende de mejoras en el hardware y software, además de estudios adicionales en pacientes reales.

Artificial Intelligence in Neurosurgery: A Bibliometric Analysis [18]

12-2022

ScienceDirect

Analiza el papel de la IA en la neurocirugía.

Se basa en el incremento de publicaciones en los últimos años y la cantidad de contribuciones a este tema por parte de diferentes países para concluir que la IA está transformando la neurocirugía mejorando la precisión y los resultados clínicos.

Hyperspectral Imaging in Brain Tumor Surgery-Evidence of Machine Learning-Based Performance [19]

03-2023

ScienceDirect

Estudio del uso de sistemas de imágenes hiperespectrales (HSI) basadas en ML para ayudar con la identificación de diferentes tipos de tejidos en intervenciones cerebrales además de poder mejorar el diagnóstico intraoperatorio.

Destaca la mayor capacidad de las HSI para realizar estos diagnósticos en comparación a las capacidades de la visión humana. También trata la necesidad de establecer estándares entre los sistemas HSI para poder ser totalmente adaptados a rutinas clínicas.

Designing predictive models for appraisal of outcome of neurosurgery patients using machine learning-based techniques [20]

03-2023

ScienceDirect

Desarrolla modelos predictivos utilizando técnicas de ML para evaluar los resultados de pacientes que se han sometido a neurocirugía.

Se basa en datos de 1200 pacientes que utiliza para conseguir encontrar factores que ayuden a los modelos a ser más fiables.

Gracias a esto, estos modelos han demostrado ser fiables prediciendo resultados tras las cirugías. Así se pueden identificar los pacientes con más riesgos y utilizar mejor los recursos de los hospitales.

Predictive model for early functional outcomes following acute care after traumatic brain injuries: A machine learning-based development and validation study [21]

03-2023

ScienceDirect

Desarrolla un modelo predictivo basado en ML para evaluar los resultados funcionales tempranos en pacientes con lesiones cerebrales graves por traumatismo.

Este modelo se basa en datos de pacientes anteriores para intentar predecir la evolución del paciente después de aplicar el tratamiento. Esto puede ayudar a planificar mejor estos tratamientos y a gestionar mejor los recursos de los hospitales, lo que significa un mejor cuidado de los pacientes.

Proposed applications of machine learning to intraoperative neuromonitoring during spine surgeries [22]

07-2023

ScienceDirect

El sistema de monitorización neurofisiológica intraoperatoria (IONM) que se utiliza actualmente en cirugías de columna vertebral permite detectar lesiones y déficits neurológicos potenciales.

Actualmente el IONM tiene diferentes limitaciones como la distinta habilidad de los técnicos para interpretar señales, retrasos en la comunicación, resultados falsos positivos o negativos y protocolos de solución de problemas no estandarizados.

Para solventar estas limitaciones, el artículo propone utilizar el ML para crear un sistema de alerta en tiempo real.

Recent Outcomes and Challenges of Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning in Neurosurgery [23]

02-2024

ScienceDirect

Analiza los avances y los desafíos de la IA, el ML y el DL en la neurocirugía.

Estas tecnologías están mejorando mucho la precisión en el diagnóstico, la planificación quirúrgica y la rehabilitación de los pacientes. Por otro lado, también identifica desafíos importantes como la calidad de los datos, el sesgo en los algoritmos, las cuestiones regulatorias y éticas, y los costos asociados.

Concluye que, a pesar de esos desafíos, la IA tiene puede mejorar considerablemente los resultados clínicos y la eficiencia en la neurocirugía.

Bridging Minds and Machines: The Recent Advances of Brain-Computer Interfaces in Neurological and Neurosurgical Applications [24]

05-2024

ScienceDirect

Revisa los avances recientes en las interfaces cerebro-computadora (BCI) aplicadas en neurocirugía.

Estos sistemas interpretan señales cerebrales, por lo que los pacientes que tienen discapacidades pueden mejorar su comunicación mediante el control de dispositivos externos. Sobre todo, se aplican en el control de prótesis, rehabilitaciones de ictus y en enfermedades neurodegenerativas.

Encuentra algunos desafíos técnicos, como la interpretación precisa de las señales cerebrales y la calibración individual.

También analiza las preocupaciones éticas relacionadas con la dependencia tecnológica y la privacidad de los datos.

Promises and Perils of Artificial Intelligence in Neurosurgery [25]

11-2019

Web of Science

Analiza los beneficios y peligros de la inteligencia artificial (IA) en la neurocirugía.

Beneficios: Mejora de la precisión en los diagnósticos y procedimientos quirúrgicos, personalización de tratamientos, análisis de grandes cantidades de datos.

Riesgos: Dependencia excesiva de la tecnología, Posibilidad de cometer errores al malinterpretar los algoritmos por parte humana, problemas éticos al tomar decisiones de manera automática sin supervisión.

También destaca la importancia de mantener las habilidades de los cirujanos y la necesidad de supervisión humana constante para reducir los riesgos asociados a la automatización.

Advancements in predicting outcomes in patients with glioma: a surgical perspective [26]

03-2020

Web of Science

Revisa los avances en la predicción de resultados en pacientes con gliomas en las cirugías.

Gracias a la integración de la IA y el ML en la neurocirugía los cirujanos pueden tomar mejores decisiones basándose en las predicciones de los resultados de los pacientes. Esto también ayuda a personalizar de manera individual los tratamientos.

En los pacientes con gliomas, estas tecnologías pueden llegar a ser muy importantes para mejorar sus procedimientos quirúrgicos.

Big data, machine learning, and artificial intelligence: a field guide for neurosurgeons [27]

10-2020

Web of Science

Guía para neurocirujanos sobre el uso de big data, aprendizaje automático e inteligencia artificial.

Con la gran capacidad de estas tecnologías para analizar datos y mejorar la precisión en los diagnósticos, la neurocirugía puede cambiar completamente mejorando considerablemente los resultados.

Destaca los desafíos a la hora de integrar de estas tecnologías en entornos reales, como la necesidad de formación adecuada para los cirujanos y la implementación de sistemas que sean capaces de garantizar la seguridad de los tratamientos basados en IA.

Artificial Intelligence in Brain Tumour Surgery-An Emerging Paradigm [28]

10-2020

Web of Science

Estudia el papel actual y futuro de la inteligencia artificial en cirugías de tumores cerebrales.

El tratamiento de los pacientes con tumores cerebrales puede cambiar totalmente al incluir la IA en este campo. Mejorarían los diagnósticos, se optimizarían los procedimientos e incluso puede asistir durante las operaciones mejorando los pronósticos para los pacientes.

Además, en el estudio se tratan las barreras que existen a la hora de implementar de manera correcta estas tecnologías y las preocupaciones éticas.

Multimodal prognostic features of seizure freedom in epilepsy surgery [29]

01-2022 Web of Science

Revisión de documentación basada en identificar pronósticos con ausencia de convulsiones después de cirugías asociadas a epilepsias resistentes a fármacos.

Tras analizar diferentes pronósticos destaca la falta de mejoría en los resultados a lo largo del tiempo a pesar de la gran cantidad de modelos de pronósticos.

Destaca la necesidad de ajustes estadísticos en los modelos utilizando ML para mejorar la precisión en las predicciones postoperatorias.

Robotics and Artificial Intelligence in Endovascular Neurosurgery [30]

03-2022 Web of Science

Revisa el uso de la inteligencia artificial y la robótica en la neurocirugía endovascular.

Se centra en el uso de IA para realizar diagnósticos rápidos y precisos de patologías cerebrovasculares, en la mejora de procedimientos endovasculares con sistemas robóticos, y en el uso de simulaciones para el entrenamiento de médicos.

Concluye que la integración de estas tecnologías puede mejorar considerablemente la atención al paciente y optimizar los diagnósticos y los tratamientos y entrenamientos en el campo neurovascular.

Intraoperative thermal infrared imaging in neurosurgery: machine learning approaches for advanced segmentation of tumors [31]

01-2023

Web of Science

Estudia el uso de imágenes térmicas infrarrojas en operaciones y técnicas de ML para la segmentación avanzada de tumores durante la neurocirugía.

Se utilizan imágenes térmicas para conseguir información en tiempo real sobre la ubicación y los bordes de los tumores. Gracias a los algoritmos de ML, la precisión de estos sistemas mejora, lo que ayuda a los cirujanos a distinguir mejor los tumores.

Este enfoque puede conseguir una mayor precisión en las cirugías y a mejores resultados para los pacientes.

Critically reading machine learning literature in neurosurgery: a reader's guide and checklist for appraising prediction models [32]

06-2023

Web of Science

Crea una guía para que los neurocirujanos puedan analizar con criterio los estudios sobre ML en la neurocirugía. Esta guía se basa en aspectos clave para el desarrollo de modelos de ML: la formulación del problema, la adquisición de datos, el preprocesamiento de datos, el desarrollo del modelo, el desempeño del modelo y la implementación del modelo.

Basándose los estudios más relevantes crea una lista con 14 preguntas que pretenden ayudar a los médicos a comprobar la utilidad de los modelos de ML.

La idea de esta lista es guiar a lo largo de las fases del desarrollo de un modelo de ML para que todo el proceso se realice de manera adecuada.

Predicting Post-Surgical Functional Status in High-Grade Glioma with Resting State fMRI and Machine Learning [33]

05-2024

Web of Science

El estudio utiliza modelos de ML y resonancia magnética funcional en estado de reposo (RS-fMRI) para predecir los posibles resultados tras las cirugías en pacientes con glioma de alto grado (HGG).

Los modelos que se han utilizado han demostrado que la conectividad funcional del cerebro y la ubicación del tumor son factores importantes a la hora de predecir cómo va a evolucionar el paciente después de la cirugía. La precisión que han alcanzado estos modelos es de un 94,1%.

Los resultados indican que estos modelos pueden facilitar unas terapias personalizadas a los pacientes y mejorar la planificación quirúrgica.

3.3.2. Análisis de resultados

A continuación, se van a analizar los resultados obtenidos a partir de los artículos seleccionados, separándolos según los temas concretos que tratan. También se va a evaluar su relevancia en el contexto del ML aplicado a la neurocirugía.

Aplicaciones Generales de IA y Machine Learning en Neurocirugía

Artículos:

- Artificial Intelligence Applications in Clinical Neurosurgery (11-2022, Google Scholar)
- Advancements and Challenges in the Application of Artificial Intelligence in Surgical Arena: A Literature Review (10-2023, Google Scholar)
- Revolutionizing Neurosurgery and Neurology: The transformative impact of artificial intelligence in healthcare (01-2024, Google Scholar)
- Artificial Intelligence Innovations in Cerebrovascular Neurosurgery: A Systematic Review of Cutting-edge Applications (06-2024, Google Scholar)
- Artificial Intelligence in Neurosurgery: A Bibliometric Analysis (12-2022, ScienceDirect)
- Recent Outcomes and Challenges of Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning in Neurosurgery (02-2024, ScienceDirect)
- Bridging Minds and Machines: The Recent Advances of Brain-Computer Interfaces in Neurological and Neurosurgical Applications (05-2024, ScienceDirect)
- Machine Learning in Neurosurgery: Toward Complex Inputs, Actionable Predictions, and Generalizable Translations (01-2024, PubMed)

- Big data, machine learning, and artificial intelligence: a field guide for neurosurgeons (10-2020, Web of Science)

Estos estudios revisan el estado general y los avances que ha habido recientemente en la aplicación de la IA y el ML en la neurocirugía. Los temas de los que hablan los artículos que se han incluido son la automatización de los procedimientos quirúrgicos, la mejora de las técnicas de diagnóstico y la personalización de los tratamientos. Por otro lado, tratan algunos de los riesgos que pueden existir con la implementación de IA, como la posible desaparición de ciertas especialidades y la dependencia excesiva de la tecnología que puede generarse. También destacan la necesidad de que estos sistemas tengan una supervisión continua por parte del personal médico para poder asegurar que la utilización de estas tecnologías sea segura.

Desafíos Técnicos y Éticos de la IA en Neurocirugía

Artículos:

- The challenges of deep learning in artificial intelligence and autonomous actions in surgery (11-2022, Google Scholar)
- Promises and Perils of Artificial Intelligence in Neurosurgery (11-2019, Web of Science)

Estos artículos hablan de los desafíos técnicos y éticos del uso del aprendizaje profundo dentro de la neurocirugía. Destacan los problemas técnicos existentes debido a la necesidad de utilizar datos de alta calidad y la interpretación de algoritmos complejos. También los desafíos éticos de la aceptación de la IA en la práctica clínica y la posible dependencia excesiva de la tecnología que puede aparecer. Insisten mucho en que es necesario para reducir los riesgos mantener las habilidades de los cirujanos por si aparecen problemas y en la supervisión humana constante de los procesos automatizados.

Modelos Predictivos y Resultados Postoperatorios

Artículos:

- Designing predictive models for appraisal of outcome of neurosurgery patients using machine learning-based techniques (03-2023, ScienceDirect)

- Predictive model for early functional outcomes following acute care after traumatic brain injuries: A machine learning-based development and validation study (03-2023, ScienceDirect)
- Comparison of Brain Injury Mortality Prediction by Machine Learning Models: logistic regression and support vector machine (03-2023, Google Scholar)
- Application of machine learning to predict the outcome of pediatric traumatic brain injury (11-21, Science Direct)
- Multimodal prognostic features of seizure freedom in epilepsy surgery (01-2022, Web of Science)
- Critically reading machine learning literature in neurosurgery: a reader's guide and checklist for appraising prediction models (06-2023, Web of Science)

Estos estudios se centran en el desarrollo de modelos predictivos mediante ML para anticiparse a los posibles resultados de las intervenciones a los pacientes en neurcirugía. Los modelos que se utilizan han tenido una gran precisión a la hora de predecir estos resultados ya que identifican factores clave que pueden utilizar para estas predicciones. Estos avances pueden ayudar a mejorar la planificación de los tratamientos y la gestión de los recursos de los hospitales ya que pueden predecir posibles complicaciones y personalizar los cuidados de los pacientes tras las cirugías.

Aplicaciones de ML en Diagnóstico y Tratamiento de Tumores

Artículos:

- Machine learning-based identification of lower grade glioma stemness subtypes discriminates patient prognosis and drug response (01-2022, ScienceDirect)
- Hyperspectral Imaging in Brain Tumor Surgery-Evidence of Machine Learning-Based Performance (03-2023, ScienceDirect)
- Imaging Biomarkers of Glioblastoma Treatment Response: A Systematic Review and Meta-Analysis of Recent Machine Learning Studies (01-2022, PubMed)
- Artificial Intelligence in Brain Tumour Surgery-An Emerging Paradigm (10-2020, Web of Science)
- Advancements in predicting outcomes in patients with glioma: a surgical perspective (03-2020, Web of Science)

- Intraoperative thermal infrared imaging in neurosurgery: machine learning approaches for advanced segmentation of tumors (01-2023, Web of Science)
- Predicting Post-Surgical Functional Status in High-Grade Glioma with Resting State fMRI and Machine Learning (05-2024, Web of Science)

Estos artículos analizan el uso de ML en el diagnóstico y tratamiento de tumores cerebrales. Se centran, mediante diferentes aplicaciones del ML, en intentar mejorar la precisión de los diagnósticos. El tratamiento de los tumores cerebrales no es sencillo y el uso de estas herramientas hace que se pueda predecir de manera fiable el resultado de los pacientes después de los tratamientos además de ayudar a elegir los tratamientos más efectivos para cada uno. Con esto el pronóstico de los pacientes puede mejorar de manera considerable.

Aplicaciones en Cirugía de Columna y Neurorrehabilitación

Artículos:

- Machine Learning Applications in Spine Surgery (10-2023, Google Scholar)
- The application of navigation system based on augmented reality head-mounted devices in spine surgery (04-2022, ScienceDirect)
- Proposed applications of machine learning to intraoperative neuromonitoring during spine surgeries (07-2023, ScienceDirect)
- A review of robotics in neurorehabilitation: Towards an automated process for upper limb (04-2018, PubMed)

Estos artículos revisan las aplicaciones del aprendizaje automático y la robótica en las cirugías de columna y la rehabilitación neuronal. Los estudios que se han incluido tratan de cómo los modelos de ML pueden ayudar en la clasificación preoperatoria, la selección de pacientes y la planificación quirúrgica.

Entre las aplicaciones que tratan destacan los dispositivos de realidad aumentada para mejorar la precisión de los procedimientos y la robótica para automatizar las rehabilitaciones.

Aplicaciones en Neurocirugía vascular.

Artículos:

- Robotics and Artificial Intelligence in Endovascular Neurosurgery (03-2022, Web of Science)

Este artículo revisa el uso de la inteligencia artificial y la robótica en la neurocirugía endovascular, centrándose en el uso de IA para diagnósticos rápidos y precisos de patologías cerebrovasculares, la mejora de procedimientos endovasculares con sistemas robóticos, y el uso de simulaciones para el entrenamiento de médicos.

4. Desarrollo de aplicación móvil: NeuroML

Se ha desarrollado una aplicación móvil para dispositivos Android con el objetivo de demostrar que es posible aplicar modelos de ML dentro del campo de la neurocirugía. La aplicación NeuroML, se ha desarrollado en Android Studio y se ha basado en Java. Se ha utilizado el framework TensorFlow para poder ejecutar los modelos ya entrenados directamente desde el dispositivo. Estos modelos han sido entrenados en la plataforma web Google Colab, que está basada en Jupyter Notebooks.

4.1.1. Sistema Operativo y entorno de desarrollo

Android es un Sistema Operativo que actualmente domina el mercado de los dispositivos móviles inteligentes. Además, es un software de código abierto basado en Java, lo que facilita la programación para este SO en comparación con su competidor iOS. Debido a esto ha sido elegido como el SO en el que basar la aplicación.

El entorno de desarrollo que se ha seleccionado para la aplicación es Android Studio. Se ha elegido porque al pertenecer a Google y estar diseñado específicamente para aplicaciones Android, asegura una total integración con las herramientas y librerías disponibles y compatibilidad con el SO. Además, tiene de base un editor de interfaz gráfica y un emulador de Android, lo que facilita bastante el desarrollo.

4.1.2. Funcionalidades

NeuroML tiene dos flujos principales que han sido diseñados para generar predicciones clínicas a partir de los datos de un paciente: un test rápido “Quick Test” y un test completo “Complete Test”.

Quick Test

Este flujo permite obtener una predicción rápida de las probabilidades de hospitalización, de visita a urgencias y de muerte, basándose únicamente en la edad del paciente y la causa del traumatismo. Para conseguir esto se ha utilizado el modelo “QuickTest.tflite” generado a partir del dataset “Traumatic Brain Injury (TBI)”.

Complete Test

Este test permite al usuario introducir información clínica más detallada sobre el paciente, incluyendo los siguientes campos: edad, hábitos, tipo de lesión, causa del

trauma, admisión previa, comorbilidades, pulso, temperatura, escala de coma de Glasgow (CGS) y estado pupilar.

A partir de estos datos, se ejecutan dos modelos, uno para predecir riesgo de mortalidad ('mortality_model.tflite') y otro para estimar la probabilidad de requerir intervención quirúrgica ('intervention_model.tflite'). Estos modelos han sido desarrollados a partir del dataset "Neuro-Surgical Dataset"

Como añadido, en este test puede guardarse el paciente en caso de introducir nombre, permitiendo al usuario consultar de nuevo la predicción de un paciente sin necesidad de reintroducir los datos y pudiendo editar o eliminar el paciente posteriormente.

4.1.3. Entrenamiento de modelos

Para el entrenamiento de los modelos se ha utilizado Google Colab, basándose en dos datasets que se han seleccionado de kaggle. Esta plataforma es muy eficiente para tareas de análisis de datos y ML sin realizar una configuración compleja además de que no es necesario instalarla localmente. También tiene integración directa con Google Drive, lo que facilita la gestión de los archivos y permite guardar automáticamente los notebooks generados.

Google Colab tiene soporte completo para las bibliotecas más utilizadas en ML. La que más nos interesa es TensorFlow ya que nos permite desarrollar y entrenar modelos para convertirlos directamente al formato TensorFlow Lite (.tflite) que está específicamente diseñado para ejecutarse en dispositivos móviles con recursos limitados.

En este entorno se han entrenado dos modelos. En ambos se ha realizado un estudio previo seleccionando las variables relevantes previas al diagnóstico y que son necesarias para la predicción, además de eliminar los datos incompletos.

Traumatic Brain Injury (TBI)

Este dataset se ha utilizado para el Quick Test. Contiene información básica de pacientes con traumatismo craneoencefálico: edad, causa y resultado clínico. Se ha adaptado para crear un modelo de clasificación que estima la probabilidad de tres resultados principales: hospitalización, visita a urgencias y muerte [34].

Neuro-Surgical Dataset

Utilizado para el Complete Test. Incluye información de pacientes neuroquirúrgicos en un gran número de campos clínicos con información detallada tanto

previa al diagnóstico como posterior. Gracias a estos datos se han podido crear dos modelos con el objetivo de predecir la mortalidad y la hospitalización [35].

4.1.4. Resultado

En este punto se va a explicar el funcionamiento y las distintas pantallas de la aplicación una vez desarrollada.

Nada más abrir la aplicación aparece un selector de tipo de test que nos permite seleccionar entre las opciones de “Quick Test” o “Complete Test”.

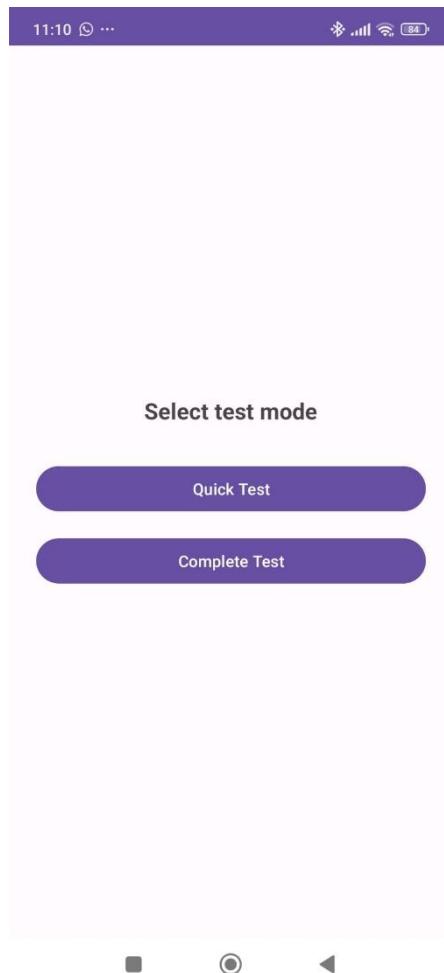


Figura 12 – Pantalla principal de la aplicación

Si se selecciona el “Quick Test” se abrirá una pantalla de introducción de campos. En esta pantalla se pide la edad y el tipo de traumatismo, con las opciones de calcular o de volver atrás.

11:10 ⌂ ...

Quick Test

Age _____

Fall from height ▾

CALCULATE

BACK

Figura 13 - Formulario del "Quick Test"

En caso de seleccionar calcular aparecerá el resultado del test basándose en el fichero “QuickTest.tflite” entrenado en colab a partir del dataset “Traumatic Brain Injury (TBI)”.



Quick Test Prediction:

Most likely: Hospitalizations

Probabilities:

Hospitalizations: 36%

Emergency Department Visit: 35%

Deaths: 30%

Back



Figura 14 - Resultado del "Quick Test"

Por otro lado, si en el menú inicial se selecciona el “Complete Test” nos llevará a un selector con las opciones de nuevo paciente o de seleccionar existente.



Figura 15 - Selector del "Complete Test"

Seleccionando la opción de existente se abrirá un listado de pacientes disponibles que a su vez permitirá mostrar la predicción, editar o eliminar el paciente. La pantalla de editar lleva a la pantalla del formulario de paciente.

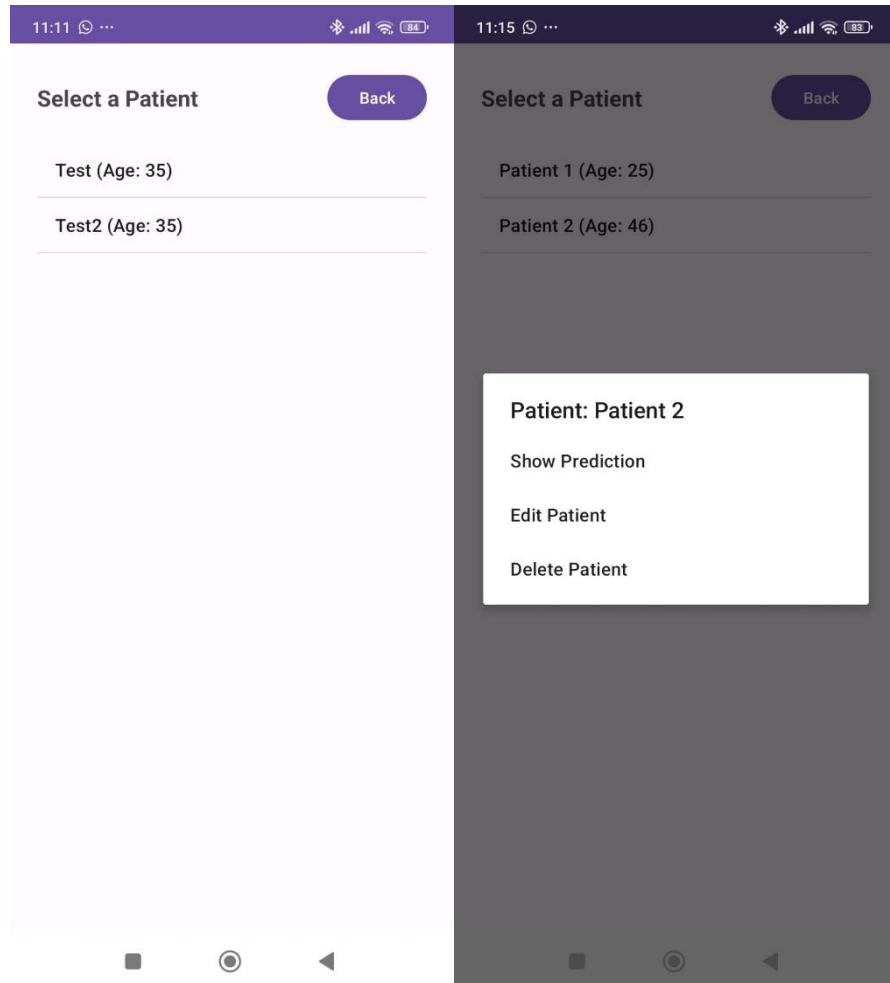


Figura 16 – Pantallas de selector y opciones de paciente

Pulsando en nuevo aparecerán los campos que pueden rellenarse con la información del paciente. En esta ventana se ofrece la opción de guardar al paciente en caso de introducir un nombre en el campo correspondiente.

11:11 84% 84%

Complete Test Back

Name (optional)

Age

Habits
Alcoholic

Injury Type
Closed

Trauma Mode
Assault

Previous Admission

Comorbidities
Diabetes

Pulse (e.g. 80)

Temperature (°C, e.g. 36.5)

GCS (3-15)

Pupils
Constricted

Show Result Without Saving

Save Patient and Show Result

Figura 17 - Formulario de paciente

Por último, desde la pantalla de selección de paciente como desde la de llenar los campos del paciente se podrá acceder al resultado de la predicción, que mostrará dos predicciones basadas en los ficheros “mortality_model.tflite” e “intervention_model.tflite” creados a partir del dataset “Neuro-Surgical Dataset”.



Figura 18 - Resultado del "Complete Test"

4.1.5. Limitaciones

A pesar de que la aplicación demuestra que es posible realizar una integración entre modelos de ML entrenados en Google Colab y su uso en dispositivos Android, se han encontrado algunas limitaciones importantes que se deben tener en cuenta y que perjudican el rendimiento y la posibilidad de aplicar el sistema en entornos reales:

Calidad y tamaño de los datos

Los modelos utilizados se han entrenado con datasets de Kaggle que no han sido diseñados específicamente para predecir mortalidad ni la necesidad de intervención quirúrgica en pacientes con traumatismos, que eran los objetivos que se buscaban con este desarrollo. Además, el número de muestras no llega a la cantidad necesaria para poder garantizar una gran precisión. Cuando el entrenamiento se realiza sobre un conjunto de datos pequeño o con campos que no son del todo precisos puede pasar que el modelo aprenda patrones que no se parezcan lo suficiente a la realidad.

Homogeneización artificial de categorías

Debido a que algunos valores de las distintas categorías se escribían de manera diferente y se referían a lo mismo, ha sido necesaria una revisión manual de los textos para adecuarlos al modelo. Aunque esta revisión haya sido necesaria, ha podido reducir la calidad de los datos al poder perderse matices relevantes que podrían mejorar la predicción.

Supuestos clínicos simplificados

Las variables clínicas seleccionadas se basan en campos que se encontraban disponibles en los datasets, no necesariamente en los predictores más relevantes desde el punto de vista médico. Además, no se ha contado con validación por parte de especialistas clínicos, lo que convierte por el momento a la aplicación en un prototipo en lugar de ser una herramienta de diagnóstico válida.

Modelo estático

Una vez que el modelo ya se ha entrenado en Colab y se ha convertido al formato “.tflite”, su lógica queda fija. La aplicación no puede reentrenar el modelo automáticamente con nuevos datos ni adaptar su comportamiento según variaciones importantes como podrían ser la población o el entorno clínico donde se aplique.

4.1.6. Próximos pasos

Para conseguir que la aplicación NeuroML evolucione para ser una herramienta más robusta y útil, se proponen las siguientes líneas de mejora:

Obtención de datos clínicos reales y personalizados

Colaborar con instituciones sanitarias para recoger datos reales de pacientes con TCE. Esta información, al estar validada por profesionales de la salud, permitiría entrenar modelos con mayor calidad que estén ajustados a las necesidades diagnósticas reales y adaptados a poblaciones concretas.

Validación clínica supervisada

Para garantizar que la aplicación sea precisa, es necesario que pase por pruebas de validación realizadas con profesionales de la salud que comparan las predicciones que realice con casos reales. Así podrá comprobarse su utilidad en entornos hospitalarios reales.

Entrenamiento y actualización continua

Implementar un servidor en la nube donde se almacenen de forma segura nuevos casos clínicos que permitan reentrenar los modelos periódicamente con arquitecturas de red más complejas, mejorando su rendimiento conforme aumentan los datos disponibles.

Mejoras en la interfaz y experiencia de usuario

- Incorporar gráficos o barras de riesgo para conseguir un resultado más intuitivo.
- Añadir historial clínico por paciente y generación de reportes PDF.
- Multilenguaje.

Exportación e integración

Hacer que los resultados puedan ser exportados en formatos que sean compatibles con los sistemas utilizados en los hospitales para hacer posible su integración.

4.1.7. Conclusiones

NeuroML es una aplicación que utiliza el ML en el campo de la neurocirugía, proporcionando una herramienta que puede ser utilizada desde dispositivos Android para predecir riesgos de mortalidad y la necesidad de intervención quirúrgica en pacientes con traumatismo craneoencefálico. Utiliza tecnologías como Goole Colab para la parte del entrenamiento del modelo y Android Studio para el desarrollo de la aplicación Java y el desarrollo de la interfaz de usuario. En esta aplicación se pueden ejecutar directamente los modelos “.tflite”, lo que hace que sea posible realizar predicciones en tiempo real desde un smatphone.

Es importante destacar una limitación de la aplicación desarrollada: los datasets utilizados no han sido específicamente diseñados para este uso concreto aunque cumplen con los requisitos necesarios para que los modelos se puedan entrenar correctamente. Los datos provienen de fuentes públicas (Kaggle) por lo que algunas categorías no son del todo claras además de que hay una cantidad de muestras limitada para algunos de los subgrupos. Esto puede provocar resultados poco precisos en algunos casos.

A pesar de todo esto, el resultado indica un gran potencial de las aplicaciones de este tipo. El modelo consigue establecer relaciones que consiguen arrojar porcentajes de riesgo que se encuentran dentro de lo razonable incluso con los problemas mencionados. Esto indica que las predicciones podrían aumentar considerablemente la precisión con un conjunto de datos más completo, estandarizado y supervisado por profesionales médicos, favoreciendo la aparición de herramientas de ayuda al diagnóstico mediante IA en entornos reales en el futuro.

En resumen, NeuroML demuestra que es técnicamente posible desarrollar un sistema móvil basado en ML para ayudar en la toma de decisiones médicas complejas. El desarrollo de aplicaciones completas de este estilo podría suponer una gran ayuda para el personal médico e incluso para los pacientes, especialmente en contextos de urgencia.

5. Discusión

Tras analizar los resultados que se han obtenido después de aplicar el protocolo PRISMA han aparecido algunos aspectos importantes sobre el estado actual de la investigación del ML aplicado a la neurocirugía.

Volumen de publicaciones

En la primera búsqueda realizada aparecieron un total de 12186 artículos que estaban relacionados con el ML en la neurocirugía. Sin embargo, después de aplicar PRISMA, sólo 29 publicaciones han sido seleccionadas para un análisis detallado. Por un lado, la gran cantidad de resultados iniciales reflejan el gran interés que hay actualmente sobre este campo. Pero la gran cantidad de descartes que se han realizado en el proceso destaca la importancia de realizar un proceso de selección riguroso para poder asegurar la calidad y relevancia de los estudios incluidos, ya que existe una gran proporción de estudios que son poco relevantes o repetitivos.

Distribución Temporal

En el análisis se ha visto un claro incremento en el volumen de publicaciones en los últimos años. Esto significa que el interés sobre este campo está aumentando y hay cada vez más investigación al respecto con la idea de ser implementado en hospitales. Además, al haber avanzado la tecnología en general es más sencilla la creación de estos modelos y puede también haber influido.

Después de la fase de inclusión, la mayoría de los estudios seleccionados también se han encontrado en los años 2022, 2023 y 2024. Esta coincidencia significa que los trabajos más recientes, al haber conseguido superar los criterios de selección, son los de mayor calidad. Estos artículos tienen una mejor metodología más sólida y se centran en apartados pensados para ser aplicados en entornos reales.

Distribución por Base de Datos

El principal motor de búsqueda en la fase inicial fue Google Scholar. Conténía el 68% de los resultados iniciales. La siguiente era ScienceDirect con un 22%. Estas dos fuentes incluían ellas solas un 90% de los resultados totales.

Después de la fase de inclusión, ScienceDirect (35%) y Web of Science (31%) fueron las que más resultados encontraron. Google Scholar bajó a un 24%.

Esto indica que la mayor calidad de publicaciones en proporción de los artículos totales la tienen ScienceDirect y Web of Science y que las publicaciones más relevantes están distribuidas de manera uniforme entre las bases de datos utilizadas en el estudio.

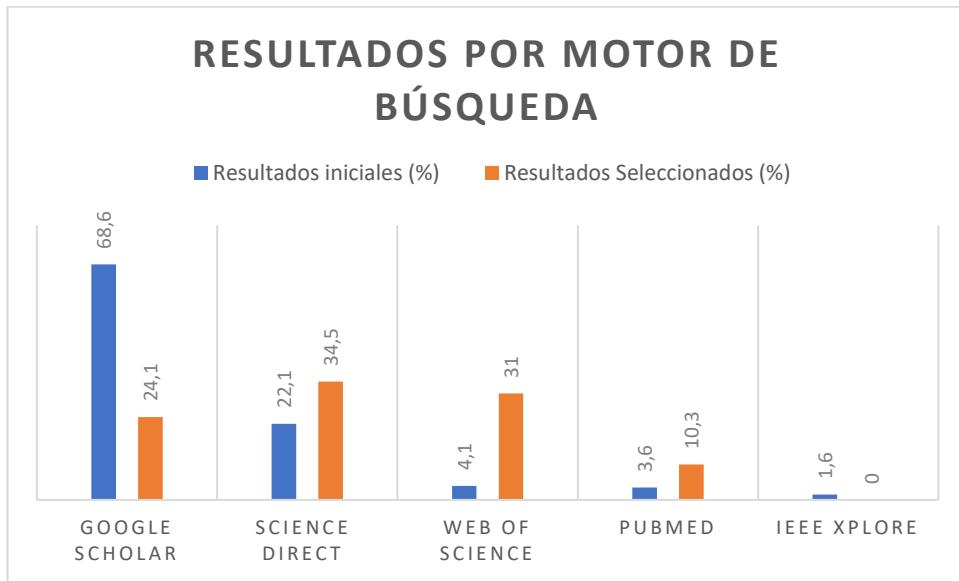


Figura 19 - Porcentaje de resultados por motor de búsqueda

En vista de estos resultados, para evitar que existan sesgos y que la revisión sea lo más correcta posible, es necesario realizar búsquedas sistemáticas en diferentes bases de datos. Además, la falta de documentos de IEEE Xplore en la selección final puede significar que este motor contiene menos trabajos con aplicaciones clínicas directas, aunque sea muy relevante en ingeniería.

Calidad y Relevancia de las Publicaciones

Los artículos que se han seleccionado finalmente tras la fase de inclusión se centran sobre todo en aplicaciones prácticas y estudios clínicos que tratan de la eficacia de los modelos de ML en la predicción de resultados ayudando considerablemente a facilitar y mejorar los resultados de las intervenciones. Como los modelos utilizados en estos estudios han sido entrenados con datos clínicos reales, permiten comprobar la eficacia de la aplicación en entornos reales.

Temas Emergentes y Relevancia Clínica

Los estudios más recientes de los que hemos analizado tratan de aplicaciones prácticas del ML en la neurocirugía. Entre ellas destacan la predicción de resultados postoperatorios, la planificación quirúrgica y la guía durante las operaciones. Estas aplicaciones tienen un enorme potencial para ayudar a los profesionales a tomar mejores decisiones y mejorar la eficiencia de los recursos sanitarios optimizando y mejorando los

procesos clínicos. Además, la integración de los algoritmos de predicción permite personalizar los procedimientos quirúrgicos.

Los artículos que han pasado la selección indican que cada vez se está investigando más en esta área y que se está avanzando rápidamente. Se centran sobre todo en partes en las que los resultados pueden mejorar de manera considerable.

Aplicación NeuroML

Tras el desarrollo de esta aplicación se han encontrado algunos aspectos que deben ser tenidos en cuenta sobre la calidad de los datos que se utilizan en los proyectos de ML en el ámbito de la salud. Uno de los principales desafíos que se han encontrado es que los conjuntos de datos de Kaggle que se han utilizado para entrenar los modelos no estaban específicamente diseñados para el objetivo que tenía esta aplicación. Al poder faltar variables que sean relevantes o que algunas de ellas no hayan sido recogidas con el suficiente rigor la precisión que tiene puede verse afectada.

Además, para la codificación de estos datos ha sido necesaria una normalización antes de poder utilizarlos para generar un modelo de ML preciso. Otro limitante a la hora de poder generalizar los resultados obtenidos es que el número de pacientes es muy reducido los datos no han sido validados dentro de un entorno real. Aun así, todo esto ayuda a entender mejor qué necesita un buen flujo de datos bien organizado, y contribuye al debate sobre cómo recopilar datos de mayor calidad de cara al futuro.

6. Conclusiones

El análisis de los artículos seleccionados mediante el protocolo PRISMA subraya la evolución y el impacto creciente que está teniendo el ML en la neurocirugía. Las principales conclusiones del estudio son:

Incremento en la Investigación y Aplicaciones Clínicas

En los últimos años, la cantidad de publicaciones relacionadas con el ML aplicado a la neurocirugía se ha multiplicado de una manera exponencial. Estas aplicaciones han evolucionado desde una simple clasificación de imágenes médicas hasta el desarrollo de sistemas complejos de predicción de resultados clínicos y asistencia intraoperatoria.

Uno de los aspectos más importantes es que el ML ha permitido poder proporcionar una atención personalizada gracias a la mejora de la precisión diagnóstica y la mejor planificación de pacientes. Esto se ha conseguido gracias a modelos basados en redes neuronales profundas que pueden detectar tumores de manera temprana además de predecir las respuestas a los tratamientos de los pacientes, mejorando la planificación terapéutica y el pronóstico de los pacientes.

El área de la planificación preoperatoria también se encuentra en expansión. Se han podido minimizar riesgos y personalizar las estrategias procesando grandes volúmenes de datos de resonancias magnéticas y tomografías que permiten obtener escenarios quirúrgicos favorables.

En el apartado quirúrgico, tanto las técnicas de segmentación basadas en ML como las imágenes hiperespectrales, han ayudado a poder interpretar de una manera más precisa el tejido de los tumores, reduciendo el posible daño del tejido sano que lo rodea, minimizando las complicaciones y favoreciendo una recuperación más rápida. Además, la realidad aumentada unida a modelos de ML permite asistencia en quirófano, lo que vuelve a las intervenciones más seguras.

Importancia de la Calidad de los Estudios

Para asegurar que las conclusiones y aplicaciones clínicas se basen en la mejor evidencia disponible se ha aplicado el protocolo PRISMA, lo que ha permitido identificar estudios relevantes con una gran calidad. Esta selección ha permitido ver que de la gran cantidad de documentos que han aparecido en las búsquedas, muchos de ellos no cumplen con los estándares metodológicos necesarios para su aplicación clínica. Por ello, es necesario mejorar la calidad y transparencia de las futuras investigaciones sobre este tema

para que puedan ser reproducidas, incorporando validaciones externas y diseños de estudio más robustos.

Diversificación de las Fuentes de Información

Las publicaciones seleccionadas están distribuidas de manera bastante pareja entre las bases de datos utilizadas. Para cualquier campo de estudio es necesario buscar en varias fuentes para poder obtener información completa del estado del arte. Tras este análisis se puede observar que hay algunas bases de datos, como ScienceDirect o Web of Science, con un mayor porcentaje de estudios relevantes, lo que indica una mejor criba a la hora de publicar los diferentes estudios.

Desafíos Técnicos y Éticos

Aunque los progresos son abundantes, aún existen desafíos importantes en la aplicación del ML dentro de la neurocirugía. Uno de ellos es la necesidad de utilizar datos de calidad y correctamente etiquetados. Pueden existir problemas de generalización y desempeño debidos a las diferencias entre los hospitales, los equipos que usan y las formas de recoger los datos que después se utilizan por los modelos de ML. Todo esto complica su aplicación dentro del ámbito clínico.

Para que esta tecnología pueda implementarse hay que superar diversos obstáculos tanto éticos como jurídicos. Es totalmente necesario regular la responsabilidad en caso de fallos ya que el sistema sería responsable de tomar algunas decisiones. También es obligatorio conservar la privacidad de la información de los pacientes. Además, se deberían estandarizar los protocolos de uso de los modelos de ML para poder ser utilizados en un gran número de hospitales.

También es crucial tener en cuenta los peligros que puede representar el empleo de esta tecnología en la neurocirugía. Dada la complejidad de este campo, hay que tener muy en cuenta el peligro de introducir prejuicios en los algoritmos a causa de utilizar bases de datos no representativas, las cuales podrían conducir a decisiones equivocadas y peligrosas en el tratamiento de pacientes.

Futuras Investigaciones

Es fundamental seguir investigando y, sobre todo, validar clínicamente las nuevas aplicaciones del ML, centrándose en superar los desafíos tanto técnicos como éticos para poder incluir estas tecnologías en la práctica de forma correcta. También es importante el desarrollo de modelos explicables, que permitan a los neurocirujanos entender y confiar en las recomendaciones de los algoritmos ya que, siendo un área en la que las decisiones

son cruciales, desconocer por qué el algoritmo ha llegado a una conclusión puede llevar a dudas de los profesionales que impidan la toma de las decisiones más apropiadas.

Desafíos en aplicaciones de ML

La aplicación ha conseguido predecir resultados de manera adecuada en base a los datos que se utilizaron para su desarrollo. Esto demuestra la utilidad que podría tener en un entorno hospitalario real.

Aunque el conjunto de datos tiene algunas limitaciones, los resultados indican que, con un buen entrenamiento, este tipo de herramientas puede llegar a ser muy útil como ayuda en el diagnóstico inicial. Si los datos que se han utilizado fueran más completos y estuviesen pensados específicamente para hacer predicciones la precisión de los modelos mejoraría considerablemente. Esto permitiría un uso más general de estos sistemas dentro de los hospitales y centros de salud.

En resumen, el ML puede llegar a transformar totalmente la neurocirugía gracias a la introducción de nuevas herramientas que ayuden a mejorar la precisión y los resultados de los pacientes. Para que esto se pueda alcanzar, es muy importante seguir investigando y realizar la adopción de estas tecnologías con cuidado, utilizando políticas que consigan una integración completamente segura. De esta manera se podrá progresar y conseguir revolucionar el cuidado de los pacientes en este campo tan complicado y desafiante.

7. Bibliografía

[1] R. G. Ellenbogen, L. N. Sekhar y N. Kitchen, «Principles of Neurological Surgery,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323431408/principles-of-neurological-surgery#book-description>.

[2] S. J. Russell y P. Norvig, «Inteligencia Artificial. Un enfoque moderno,» 2004. [En línea]. Available: <https://luismejias21.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/09/inteligencia-artificial-un-enfoque-moderno-stuart-j-russell.pdf>.

[3] Coursera, «What Is Machine Learning? Definition, Types, and Examples,» 27 03 2024. [En línea]. Available: <https://www.coursera.org/articles/what-is-machine-learning>.

[4] M. J. Page, J. McKenzie, P. M. Bossuy, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, L. Shamseer, J. M. Tetzlaf, E. A. Akl, S. E. Brennan, R. Chou, J. Glanville, J. M. Grimshaw, A. Hrobjartsson, M. M. Lalu, T. Li, E. W. Loder, E. Mayo-Wilson, S. McDonald, L. A. McGuinness, L. A. Stewart, J. Thomas, A. C. Tricco, V. A. Welch, P. Whiting y D. Moher, «Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.revespcardiol.org/es-declaracion-prisma-2020-una-guia-articulo-S0300893221002748>.

[5] P. Sobhanian, M. Shafizad, S. Karami, F. Mozaffari, A. Arab, G. Razani, P. Shafiekhani y S. Safari, «Artificial Intelligence Applications in Clinical Neurosurgery,» *Precision Medicine and Clinical OMICs*, 2022.

[6] H. Taher, V. Grasso, S. Tawfik y A. Gumb, «The challenges of deep learning in artificial intelligence and autonomous actions in surgery,» *Artificial Intelligence in Surgery*, 2022.

[7] S. C. da Silva Chaves, I. M. Maran de Souza, J. A. Guimarães Dourado, H. Lico de Souza, E. J. Domingues y A. J. M. de Oliveira, «Comparison of Brain Injury Mortality Prediction by Machine Learning Models: logistic regression and support

vector machine. Systematic review and meta-analysis,» *JORNAL BRASILEIRO DE NEUROCIRURGIA*, 2023.

- [8] T. Tragaris, I. S. Benetos, J. Vlamis y S. Pneumaticos, «Machine Learning Applications in Spine Surgery,» *Cureus*, 2023.
- [9] S. Aslam, R. H. Mithany, S. Abdallah, M. Abdelmaseeh, F. Gerges, M. S. Mohamed, M. Manasseh, A. Wanees, M. H. Shahid, M. Saied Khalil y N. Daniel, «Advancements and Challenges in the Application of Artificial Intelligence in Surgical Arena: A Literature Review,» *Cureus*, 2023.
- [10] H. Hamam, «Revolutionizing Neurosurgery and Neurology: The transformative impact of artificial intelligence in healthcare,» *Computing and Artificial Intelligence*, 2024.
- [11] P. Roy, A. Amit, G. Tanvi, B. Komal, F. Ahmed, K. Bakhtyar, M. Tendulkar, S. Ghosh, S. R. Ali, S. Das, R. Tendulkar,, Y. Lathwal, A. Senthil, K. Khullar, A. Shree y M. Kundu, «Artificial Intelligence Innovations in Cerebrovascular Neurosurgery: A Systematic Review of Cutting-edge Applications,» *Research Square*, 2024.
- [12] E. D. Oña, R. Cano-de la Cuerda, P. Sánchez-Herrera, C. Balaguer y A. Jardón, «A review of robotics in neurorehabilitation: Towards an automated process for upper limb,» *Healthcare Engineering*, 2018.
- [13] T. C. Booth, M. Grzeda, A. Chelliah, A. Roman, A. Al Busaidi, C. Dragos, H. Shuaib, A. Luis, A. Mirchandani, B. Alparslan, N. Mansoor, J. Lavrador, F. Vergani, K. Ashkan, M. Modat y S. Ourselin, «Imaging Biomarkers of Glioblastoma Treatment Response: A Systematic Review and Meta-Analysis of Recent Machine Learning Studies,» *Frontiers in Oncology*, 2022.
- [14] E. Schonfeld, N. Mordekai, A. Berg, T. Johnstone, A. Shah, V. Shah, G. Haider, N. J. Marianayagam y A. Veeravagu, «Machine Learning in Neurosurgery: Toward Complex Inputs, Actionable Predictions, and Generalizable Translations,» *Cureus*, 2024.
- [15] T. Tunthanathip y T. Oearsakul, «Application of machine learning to predict the outcome of pediatric traumatic brain injury,» *Chinese Journal of Traumatology*, 2021.

[16] H. Zhou, B. Chen, L. Zhang y C. Li, «Machine learning-based identification of lower grade glioma stemness subtypes discriminates patient prognosis and drug response,» *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 2022.

[17] P. Zhang, H. Liu, H. Li y J. JinWang, «The application of navigation system based on augmented reality head-mounted devices in spine surgery,» *Neuroscience Informatics*, 2022.

[18] V. G. El-Hajj, M. Gharios, E. Edstrom y A. Elmi-Terander, «Artificial Intelligence in Neurosurgery: A Bibliometric Analysis,» *World Neurosurgery*, 2022.

[19] S. Puustinen, H. Vrzakova, J. Hyttinen, T. Rauramaa, P. Falt, M. Hauta-Kasari, R. Bednarik, T. Koivisto, S. Rantala, M. von und zu Fraunberg, J. E. Jaaskelainen y A.-P. Elomaa, «Hyperspectral Imaging in Brain Tumor Surgery-Evidence of Machine Learning-Based Performance,» *World Neurosurgery*, 2023.

[20] B. Alizadeh, A. Alibabaei, S. Ahmadi, S. F. Maroufi, S. Ghafouri-Fard y S. Nateghinia, «Designing predictive models for appraisal of outcome of neurosurgery patients using machine learning-based techniques,» *Interdisciplinary Neurosurgery: Advanced Techniques*, 2023.

[21] M. Zhang, M. Guo, Z. Wang, H. Liu, X. Bai, S. Cui, X. Guo, L. Gao, L. Gao, A. Liao, B. Xing y Y. Wang, «Predictive model for early functional outcomes following acute care after traumatic brain injuries: A machine learning-based development and validation study,» *Injury*, 2023.

[22] J. P. Wilson, D. Kumbhare, S. Kandregula, A. Oderhowho, B. Guthikonda y S. Hoang, «Proposed applications of machine learning to intraoperative neuromonitoring during spine surgeries,» *Neuroscience Informatics*, 2023.

[23] W. A. Awuah, F. T. Adebusoye, J. Wellington, L. David, A. Salam, A. Leong Weng Yee, E. Lansiaux, R. Yarlagadda, T. Garg, T. Abdul-Rahman, J. Kalmanovich, G. D. Miteu, M. Kundu y N. I. Mykolaivna, «Recent Outcomes and Challenges of Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning in Neurosurgery,» *World Neurosurgery: X*, 2024.

[24] W. A. Awuah, A. Ahluwalia, K. Darko, V. Sanker, J. K. Tan, P. O. Tenkorang, A. Ben-Jaafar, S. Ranganathan, N. Aderinto, A. Mehta, M. H. Shah, K. L. Boon Chun, T. Abdul-Rahman y O. Atallah, «Bridging Minds and Machines: The Recent

Advances of Brain-Computer Interfaces in Neurological and Neurosurgical Applications,» *World Neurosurgery*, 2024.

- [25] S. S. Panesar, M. Kliot, R. Parrish, J. Fernandez-Miranda, Y. Cagle y G. W. Britz, «Promises and Perils of Artificial Intelligence in Neurosurgery,» *Neurosurgery*, 2019.
- [26] A. S. Jakola, L. Millgård, S. Gulati y O. Solheim, «Advancements in predicting outcomes in patients with glioma: a surgical perspective,» *Expert Review of Anticancer Therapy*, 2020.
- [27] B. Raju, F. Jumah, O. Ashraf, V. Narayan, G. Gupta, H. Sun, P. Hilden y A. Nanda, «Big data, machine learning, and artificial intelligence: a field guide for neurosurgeons,» *J Neurosurgery*, 2020.
- [28] S. Williams, H. Layard, J. P. Funnell, J. Hanrahan, D. Khan, W. Muirhead, D. Stoyanov y H. Marcus, «Artificial Intelligence in Brain Tumour Surgery-An Emerging Paradigm,» *Cancers*, 2020.
- [29] A. Alim-Marvasti, V. Niranjan y J. S. Duncan, «Multimodal prognostic features of seizure freedom in epilepsy surgery,» *J Neurology Neurosurgery Psychiatry*, 2022.
- [30] J. Bravo, A. Wali, B. Hirshman, T. Gopesh, J. Steinberg, B. Yan, J. S. Pannell, A. Norbash, J. Friend, A. Khalessi y D. Santiago-Dieppa, «Robotics and Artificial Intelligence in Endovascular Neurosurgery,» *Cureus*, 2022.
- [31] D. Cardone, G. Trevisi, D. Perpetuini, C. Filippini, A. Merla y A. Mangiola, «Intraoperative thermal infrared imaging in neurosurgery: machine learning approaches for advanced segmentation of tumors,» *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, 2023.
- [32] S. Emani, A. Swaminathan, B. Grobman, J. Duvall, I. Lopez, O. Arnaout y K. Huang, «Critically reading machine learning literature in neurosurgery: a reader's guide and checklist for appraising prediction models,» *Neurosurgical Focus*, 2023.
- [33] P. Luckett, M. Olufawo, K. Y. Park, B. Lamichhane, D. Dierker, G. T. Verastegui, J. Lee, P. Yang, A. Kim, O. Butt, M. Chheda, A. Snyder, J. Shimony y E. Leuthardt, «Predicting Post-Surgical Functional Status in High-Grade Glioma with Resting State fMRI and Machine Learning,» *Journal of Neuro-Oncology*, 2024.
- [34] J. Mostipak, «Traumatic Brain Injury (TBI),» 2020. [En línea]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/jessemostipak/traumatic-brain-injury-tbi/data>.

[35] J. Zaki, «Neuro-Surgical Dataset,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/johnzaki/neuro-surgical-dataset>.