

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ
FACULTAD DE MEDICINA
TRABAJO FIN DE GRADO EN MEDICINA



**Validación de un nuevo modelo para el
entrenamiento quirúrgico en inserción de drenajes
ventriculares para el tratamiento de la hidrocefalia**

AUTOR: SORIANO MARTINEZ, VÍCTOR

TUTOR: DE PUELLES MARTÍNEZ DE LA TORRE, EDUARDO

COTUTOR: GONZÁLEZ LÓPEZ, PABLO

Departamento de Histología y Anatomía

Curso académico 2024 - 2025

Convocatoria de Mayo

ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN	6
Anatomía del sistema ventricular.....	6
Fisiopatología de la hidrocefalia	8
Indicaciones para la inserción de un drenaje ventricular	10
HIPÓTESIS Y OBJETIVO	12
MATERIAL Y METODOLOGÍA	13
Revisión bibliográfica	13
Diseño del estudio	14
Material empleado	14
Metodología y recogida de datos.....	16
RESULTADOS	19
DISCUSIÓN	23
CONCLUSIONES.....	26
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27

RESUMEN

Introducción: El sistema ventricular cerebral genera el líquido cefalorraquídeo (LCR), cumpliendo funciones clave de protección y homeostasis del sistema nervioso central. Alteraciones en su dinámica pueden originar hidrocefalia, con o sin obstrucción al flujo de LCR. En casos agudos, el drenaje ventricular externo (DVE) es la intervención de emergencia ideal. Recientemente, han surgido nuevos métodos de entrenamiento para su colocación, evaluando con este trabajo la formación basada en realidad virtual (RV).

Hipótesis y objetivo: El uso de tecnología de RV en un entorno tridimensional puede suponer un nuevo método de entrenamiento quirúrgico válido para la colocación de un DVE. Se analizarán determinadas variables para evaluar si existen diferencias significativas en comparación con los métodos de formación tradicionales.

Material y metodología: Tras la revisión bibliográfica y análisis de la literatura, se diseña un estudio clínico aleatorizado y doble ciego, con 24 participantes sin experiencia neuroquirúrgica previa. Estos son divididos en grupo A de formación clásica y grupo B de formación avanzada con RV. Se emplean modelos físicos impresos en 3D y un entorno virtual a partir de imágenes radiológicas anonimizadas. La precisión de la inserción del DVE se evaluó mediante neuronavegación, registrando variables clave como distancia a la diana, trayectoria, localización de catéter, tiempo e intentos.

Resultados: El análisis estadístico de los datos recogidos muestra que existen diferencias significativas entre grupos a la hora de localizar el punto de

Kocher ($p = 0,02$), y respecto a la distancia del catéter a la diana en el modo 'vista de trayectoria' ($p = 0,015$), siendo ambos más precisos en el grupo de formación avanzada. La ubicación del catéter en función de las áreas de confianza establecidas y el éxito del drenaje según su localización anatómica fueron dos variables que también mostraron superioridad significativa al comparar ambos grupos ($p = 0,0058$ y $p = 0,015$, respectivamente).

Conclusiones: El grupo que recibe la formación en un entorno virtual muestra una mejoría significativa para localizar el punto de entrada óptimo y dirigir el drenaje en la trayectoria correcta, con una mayor precisión y menor riesgo de daño cerebral. Son necesarios futuros estudios sobre la aplicación de este tipo de entrenamiento en la práctica clínica habitual.

Palabras clave: Hidrocefalia, drenaje ventricular externo, ventriculostomía, realidad virtual, simulación.

ABSTRACT

Introduction: The cerebral ventricular system contains cerebrospinal fluid (CSF) and plays a key role protecting and regulating the central nervous system homeostasis. Variations in CSF dynamics can lead to hydrocephalus, with or without obstruction of CSF flow. In acute cases, an external ventricular drain (EVD) is the ideal emergency intervention. Recently, novel training methods have emerged for EVD placement, evaluating with this study the virtual reality (VR)-based training.

Hypotheses and objective: The use of VR technology in a three-dimensional environment may represent a valid new surgical training method for EVD placement. To assess this, specific variables will be analyzed to determine whether significant differences exist based on the kind of training received prior to the procedure.

Materials and methods: Following a literature review, a randomized, double-blind clinical study was designed involving 24 participants without prior surgical experience. Participants were divided into group A (classical training) and group B (advanced VR-based training). Physical models were 3D-printed, and a virtual environment was created from anonymized radiological images. EVD placement accuracy was assessed using neuronavigation, recording key variables such as target distance, trajectory, catheter location, procedure time and number of attempts.

Results: Statistical analysis of the collected data shows significant differences between groups in identifying Kocher's point ($p = 0.02$) and in catheter-to-target distance in "trajectory view" mode ($p = 0.015$), both being more accurate

in the advanced training group. Both the catheter placement according to predefined confidence zones, and drainage success based on anatomical location, showed significant superiority in the advanced training group ($p = 0.0058$ and $p = 0.015$, respectively).

Conclusions: The group that received advanced VR-based training showed significant improvement in identifying the optimal entry point and directing the drain along the correct trajectory, with greater precision and a lower risk of brain injury. Further studies are needed to evaluate the application of this type of training in routine clinical practice.

Key words: Hydrocephalus, external ventricular drain, ventriculostomy, virtual reality, simulation.



INTRODUCCIÓN

Anatomía del sistema ventricular

El sistema ventricular cerebral se compone de cavidades denominadas ventrículos, revestidas de una delgada membrana celular llamada epéndimo y que contienen en su interior una cantidad constante de líquido cefalorraquídeo (LCR). En el telencéfalo situamos los ventrículos laterales, dispuestos en forma de dos arcos en C dentro de los hemisferios cerebrales. Cada uno presenta un cuerno frontal (rostral), un cuerno occipital (posterior) y otro temporal (inferior). Los ventrículos laterales permanecen unidos al tercer ventrículo mediante el agujero interventricular de Monro, situado por detrás de los cuernos frontales. A su vez, el tercer ventrículo comunica con el cuarto a través del acueducto cerebral o de Silvio, localizado en el mesencéfalo. Podemos situar el cuarto ventrículo entre el cerebelo y el tronco del encéfalo, y vierte LCR al espacio subaracnoideo a través de los dos agujeros externos de Luschka y el agujero interno de Magendie, fluyendo entonces a través de las convexidades cerebrales y la médula espinal ^[1,2].

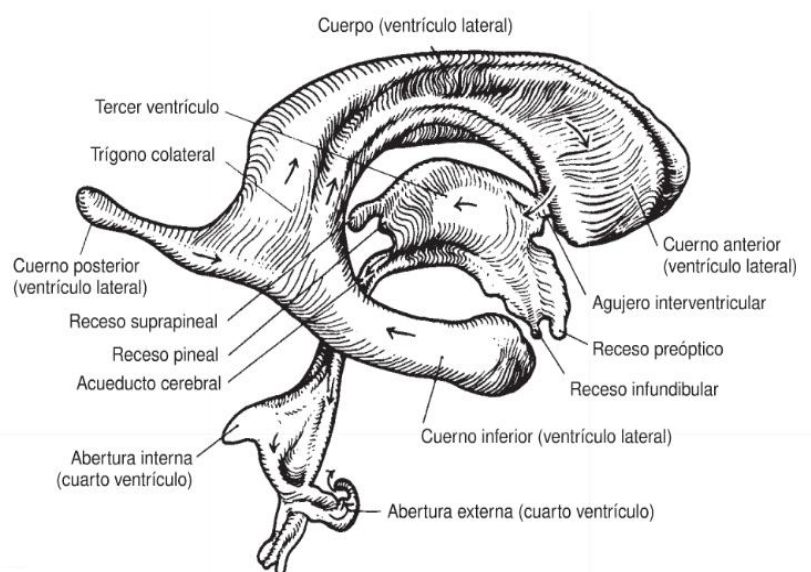


Figura 1. Vista lateral de las estructuras del sistema ventricular cerebral ^[3].

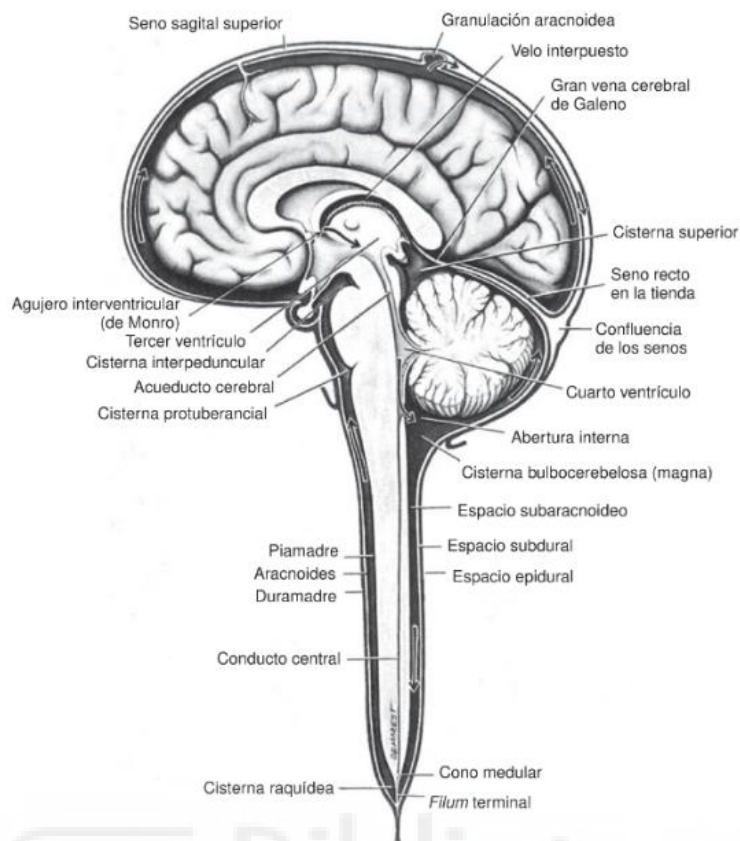


Figura 2. Vista mediosagital de los ventrículos cerebrales, espacios subaracnoideos, cisternas y meninges. Las flechas indican la dirección que sigue el flujo de LCR ^[4].

En el suelo de los ventrículos laterales y el techo del tercer y cuarto ventrículo, el plexo coroideo (formado por células endoteliales sobre un estroma de capilares fenestrados) secreta de manera pulsátil 500 mL/día de LCR. Además, juega un papel fundamental en la homeostasis y renovación de LCR, constituyendo su principal barrera frente a la sangre. De esta forma, el LCR fluye a través del sistema ventricular y espacio subaracnoideo, amortiguando al sistema nervioso central, transportando y distribuyendo nutrientes y hormonas, y eliminando productos de desecho ^[1,2,5]. La reabsorción del LCR tendrá lugar a nivel de las vellosidades aracnoideas (granulaciones de Pacchioni), protuberancias de la aracnoides localizadas en los senos venosos sagitales superiores e intracraneales y sobre las raíces de los nervios espinales. El volumen medio de LCR en adultos es

de 90 a 200 mL, con un 20% en el sistema ventricular y el resto en el espacio subaracnoideo ^[6].

Fisiopatología de la hidrocefalia

Ocasionalmente, un bloqueo de las vías o un desbalance entre la producción y absorción de LCR pueden ocasionar su acumulación excesiva y dilatación de los ventrículos cerebrales. Esta patología se conoce como hidrocefalia y puede cursar con o sin alteración de la presión intracraneal (PIC), dependiendo de la capacidad compensatoria del tejido cerebral o del cráneo ^[2,7]. Hace 200 años, George Kellie y Alexander Monro ya postulaban que el incremento en el volumen de un contenido intracraneal debía compensarse por la disminución de otro. Actualmente, conocemos que una PIC elevada puede provocar una extravasación de LCR al parénquima cerebral, ocasionando síntomas neurológicos (náuseas, vómitos, cefalea, pérdida de visión) e incluso atrofia cerebral si es persistente ^[7,8].

En 1913, Walter Dandy estableció la primera clasificación conocida de la hidrocefalia, diferenciando entre obstructivas y no obstructivas. Actualmente, esta sigue siendo la clasificación más aceptada debido a las controversias del resto de esquemas propuestos desde entonces ^[9].

Hidrocefalia comunicante (no obstructiva): Puede deberse al bloqueo a nivel del espacio subaracnoideo o de las granulaciones aracnoideas, o a una sobreproducción de LCR (hidrocefalia hipersecretora). Existe comunicación entre los ventrículos cerebrales y el espacio subaracnoideo, con dilatación uniforme de todas estas estructuras. La etiología es variada y puede deberse a hemorragias

subaracnoideas (*Figura 3*), procesos inflamatorios, cambios postinflamatorios o tumores malignos primarios ^[7,9]. En 1965, Adams y Hakim definen un tipo especial de hidrocefalia comunicante denominada hidrocefalia normotensiva, la cual parece estar causada por una alteración dinámica del flujo de LCR con o sin leve aumento de la PIC. Los pacientes estudiados presentaban deterioro cognitivo, marcha atáxica e incontinencia urinaria (tríada de Hakim), aunque con el tiempo se demuestra que solo el 30% de los casos presentan los tres síntomas simultáneamente ^[7,10,11].

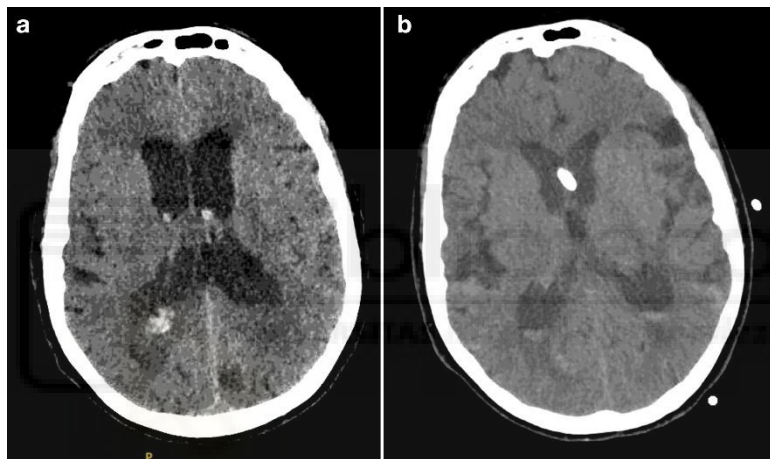


Figura 3. Paciente del HGU Dr. Balmis diagnosticado de hidrocefalia tras hemorragia subaracnoidea, antes y después de la colocación de DVE (**a** y **b**).

Hidrocefalia no comunicante (obstructiva): Existe una obstrucción al flujo de LCR dentro de los ventrículos cerebrales, que puede localizarse en distintos niveles (agujero de Monro, acueducto de Silvio, tercer ventrículo o foramen magno). Hay un defecto de comunicación entre los ventrículos y el espacio subaracnoideo, dilatándose únicamente las cavidades proximales al bloqueo. La principal causa son los tumores intracraneales, aunque también las estenosis y malformaciones congénitas, infecciones, infartos cerebelosos, metástasis o enfermedades neurodegenerativas ^[2,6,7].

Indicaciones para la inserción de un drenaje ventricular

A la hora de realizar una aproximación diagnóstica ante un paciente con un cuadro clínico de hidrocefalia aguda y pérdida de conciencia, la tomografía axial computarizada (TAC) es la principal prueba de imagen por su rapidez y accesibilidad, aunque la resonancia magnética (RM) cerebral sea la técnica de elección en patología hidrocefálica. Los hallazgos típicos son la dilatación del sistema ventricular, delgadez de los espacios periféricos y cambios hipodensos en parénquima cerebral si ha ocurrido extravasación de LCR por elevación de PIC ^[11].

Independientemente de su etiología, la hidrocefalia aguda con PIC elevada supone una situación de riesgo vital para el paciente. El drenaje ventricular externo (DVE), o ventriculostomía, es el procedimiento de elección para su correcto manejo, estableciendo una comunicación que permite drenar al exterior el exceso de LCR acumulado. Esta técnica quirúrgica de emergencia constituye uno de los procedimientos más realizados en el ámbito de la neurocirugía, siendo considerado un auténtico “life-saving treatment”. Además, su relativa simplicidad lo convierte en una de las primeras técnicas quirúrgicas realizadas por los residentes más jóvenes de Neurocirugía ^[12,13].

La decisión de colocar un DVE se basa en la clínica, exploración física y pruebas de imagen solicitadas. Idealmente, debe colocarse en quirófano, y se suele llevar a cabo ‘a ciegas’, es decir, sin referencias visuales durante el procedimiento (técnica “free-hand”), basándonos en una serie de referencias craneométricas para decidir el lugar de entrada del drenaje y su trayectoria ^[13-15].

Con el paciente en decúbito supino, cabeza en posición neutra y el tronco elevado unos 30-45°, localizamos el punto de entrada óptimo o punto de Kocher. Este se ubica, aproximadamente, a 11 cm del nasion sobre la línea media y 2.5 – 3 cm lateral a esta, coincidiendo con la línea medio-pupilar ipsilateral y 1 – 2 cm por delante de la sutura coronal (*Figura 4*). Habitualmente, se prefiere la entrada desde el lado derecho no dominante, ya que en un 90% de los pacientes diestros no está involucrado el lenguaje ni otras funciones superiores. En el plano coronal, el catéter se introduce en dirección al canto medial del ojo ipsilateral, mientras que en el plano anteroposterior hacia el conducto auditivo externo. Siempre se introducirá perpendicular a la superficie y hasta que haya avanzado 6 cm, con el objetivo de que la punta quede alojada en el foramen de Monro o tercer ventrículo, y comprobando su correcta localización con la salida espontánea de LCR ^[12,13,15].

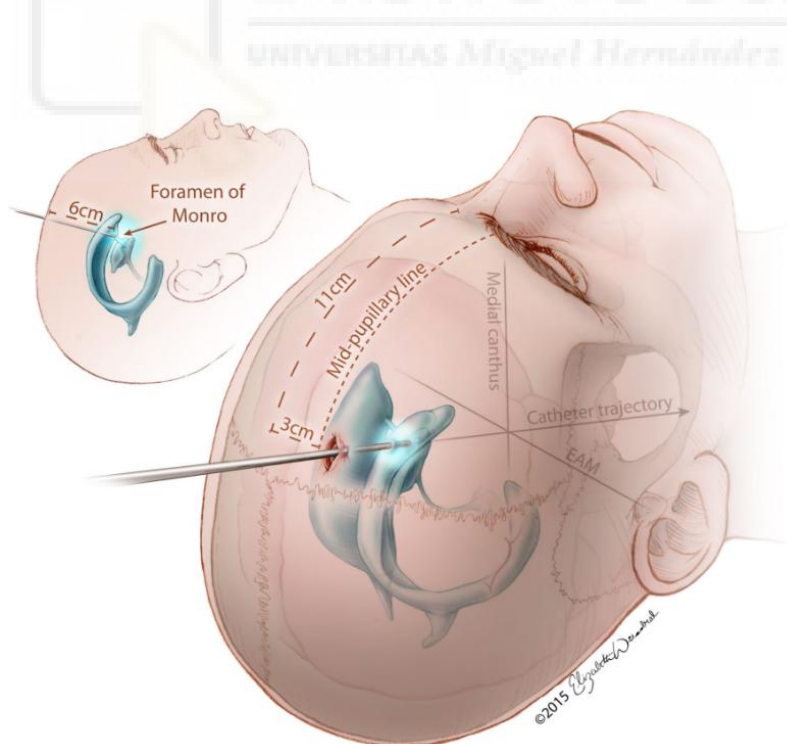


Figura 4. Acceso a través del punto de Kocher para drenaje ventricular externo. Referencias anatómicas para su localización y dirección que debe seguir el catéter ^[16].

Las complicaciones conocidas del DVE (hemorragias, infecciones, bloqueo) parecen relacionarse con su mal posicionamiento, baja experiencia del cirujano, intentos repetitivos, comorbilidades del paciente o uso prolongado del drenaje [18,20]. Ciertos estudios han demostrado que la repetición de la técnica neuroquirúrgica supone una mejora en la eficiencia y descenso de los riesgos, complicaciones y mortalidad [17,18]. Por ello, se plantean alternativas a la tradicional técnica “free-hand” para disminuir las complicaciones, los intentos y mejorar la precisión. Recientemente, se han establecido varios métodos de simulación para la colocación del DVE como fantasmas impresos 3D, modelos de gel, técnica guiada por pruebas de imagen, realidad aumentada (RA) o realidad virtual (RV). Esta última es ampliamente utilizada como parte de la planificación preoperatoria en el ámbito de la neurocirugía, además de poseer un alto potencial como método de entrenamiento, permitiendo la repetición de la técnica y el manejo de un modelo tridimensional individualizado del paciente.

HIPÓTESIS Y OBJETIVO

Conociendo el potencial de la RV como estrategia preoperatoria y la importancia del entrenamiento repetido en Neurocirugía, se sugiere que la formación basada en un entorno 3D con material de RV podría suponer mejores resultados en la colocación de un DVE que la formación clásica basada en referencias anatómicas e imágenes biplanares.

El objetivo principal de nuestro trabajo será validar un nuevo modelo de entrenamiento quirúrgico para la inserción del DVE en el tratamiento de la hidrocefalia aguda. Para ello, determinaremos las diferencias existentes en base a

determinadas variables (precisión, tiempo, intentos, localización) entre un grupo que recibirá la formación clásica para el posicionamiento del catéter y otro que recibirá una formación avanzada basada en realidad virtual. Con las variables analizadas, y haciendo hincapié en los resultados encontrados en cuanto al punto de inserción, la distancia a la diana y la alineación de la trayectoria, se compararán las diferencias obtenidas entre ambos grupos de sujetos, para así establecer si existen diferencias en el posicionamiento final del drenaje en base a la formación recibida.

MATERIAL Y METODOLOGÍA

Revisión bibliográfica

La revisión previa a la recogida y análisis de datos se inicia mediante una búsqueda bibliográfica utilizando el motor de búsqueda PubMed/MEDLINE (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>). Para ello, se emplearon los siguientes términos MeSH (*Medical Subject Headings*): “cerebral ventricles”, “cerebrospinal fluid”, “ventriculostomy”, “intracranial hypertension”, “external ventricular drain”, “simulation training” “virtual reality” y “augmented reality”. Se consideraron aquellos artículos publicados entre 2000-2025, con resumen y texto completo disponibles, sin establecer ninguna restricción respecto al idioma. Tras la búsqueda en base a los criterios y exclusión de aquellos artículos menos relevantes respecto a los objetivos a analizar, se seleccionaron 23 trabajos.

Las conclusiones extraídas de la lectura y análisis de la literatura previa servirán de base para la descripción anatómica del sistema ventricular,

fisiopatología de la hidrocefalia y las indicaciones y técnicas empleadas para la inserción de un drenaje ventricular externo. Además, repasamos las nuevas técnicas empleadas en el entrenamiento quirúrgico de este procedimiento si existieran. Esto nos servirá de apoyo para la comparación y discusión de nuestros resultados, además de ayudarnos a resaltar información no publicada previamente.

Diseño del estudio

Se diseña un estudio clínico aleatorizado y doble ciego para la evaluación de una nueva técnica de entrenamiento quirúrgico. Para ello, se incluyeron en el estudio 24 sujetos, todos ellos alumnos de 6º curso de Medicina y residentes MIR de primer año (ninguno de la especialidad de Neurocirugía), con el objetivo de que conocieran la patología pero no la técnica quirúrgica. El reclutamiento se realiza vía correo electrónico y, posteriormente, se les distribuye de forma aleatoria en el grupo de casos y controles. Ambos grupos recibieron una formación teórica en forma de charla apoyada en presentación tipo *PowerPoint* acerca de la hidrocefalia y su tratamiento quirúrgico. En cuanto a la técnica quirúrgica, los casos recibieron una formación teórica basada en un ambiente de realidad virtual, mientras que los controles recibieron la formación clásica basada en referencias anatómicas e imágenes biplanares.

Material empleado

El material empleado para llevar a cabo nuestro estudio se resume en los siguientes componentes:

Material de entrenamiento clásico. Atlas neuroanatómicos y material audiovisual con referencias anatómicas en imágenes biplanares. Presentación de *PowerPoint* en formato vídeo explicando la anatomía del sistema ventricular y fisiopatología de la hidrocefalia.

Sistema de realidad virtual (RV) y modelo físico impreso en 3D. Plataforma de simulación desarrollada con imágenes DICOM de TAC y RMN cerebrales anonimizadas, y modelo 3D interactivo del sistema ventricular, utilizado para el entrenamiento del grupo de casos. Fantoma a escala 1:1 de piel, hueso, cerebro y sistema ventricular, creado a partir de las imágenes DICOM del mismo estudio, utilizado para la realización del procedimiento en los casos y controles.

1. Adquisición de datos de imagen. Obtención de imágenes médicas anonimizadas, principalmente mediante tomografía computarizada (TC) y resonancia magnética (RM) en diferentes secuencias. Los datos se almacenan en formato DICOM, que facilita la gestión y procesamiento de las imágenes médicas.
2. Segmentación de objetos. Las imágenes DICOM se cargan en el software 3D Slicer, donde se segmentan las estructuras anatómicas de interés (piel, hueso, cerebro y sistema ventricular) utilizando herramientas manuales y semiautomáticas. Cada objeto se procesa en la modalidad de imagen que ofrezca mayor contraste y el resultado se exporta en formato STL para modelado 3D. Además del modelo craneal, se creó un modelo virtual de un catéter ventricular con la misma forma, longitud y diámetro que uno real.

3. Esculpido de objetos 3D. Los modelos STL se refinan en MeshMixer, donde se limpian, reparan y modelan. Cada objeto se guarda por separado tras el refinamiento.
4. Implementación en VR/AR. Los archivos modelados en STL se importan en el *software* Blender para añadir color, textura y realismo. Posteriormente, se exportan en formato FBX y se cargan en el visor Oculus Quest usando Gravity Sketch, permitiendo su visualización, manipulación y la inserción del catéter ventricular en un entorno de realidad virtual.
5. Impresión 3D. De forma paralela, los objetos STL se imprimen en 3D usando diversos materiales (plásticos, resinas, geles, silicona), dependiendo de las características del tejido en cuestión. El modelo servirá de plataforma física para la realización del procedimiento por ambos grupos.

Sistema de Neuronavegación Stealth S8 (Medtronic). Empleado para registro y análisis de la precisión en la inserción del catéter ventricular.

Catéteres ventriculares estándar. Utilizados por todos los participantes para la inserción en el modelo físico.

Metodología y recogida de datos

Todos los sujetos ($n = 24$) recibieron la misma formación teórica acerca de la anatomía del sistema ventricular y fisiopatología de la hidrocefalia y del LCR. Además, ambos grupos recibieron algunas nociones del tratamiento quirúrgico. A continuación, y tras realizar la agrupación de forma aleatoria, los controles recibieron la formación clásica acerca de la técnica quirúrgica, mientras que los

casos realizaron una formación inmersiva en la plataforma de realidad virtual (en Gravity Sketch).

Calibrado de la neuronavegación. Las imágenes del TAC y RMN cerebrales se implementaron en el neuronavegador. Basándonos en estas imágenes, se realizó un corregistro del fantoma creado a partir de las mismas, sobre el que tres neurocirujanos expertos en la materia se pusieron de acuerdo para escoger el punto de entrada ideal (punto de Kocher), así como la diana óptima (tercer ventrículo 5 mm en profundidad respecto al agujero de Monro). De esta forma se creó un plan de trayectoria de entrada a diana.

Introducción del catéter. Cada sujeto de ambos grupos introdujo un catéter ventricular real con un estilete neuronavegado que nos permitió registrar para cada uno de los 24 procedimientos las siguientes variables para su posterior análisis:

1. Punto de entrada: Se midió la distancia entre el punto ideal y el de cada sujeto.
2. Longitud del catéter introducido.
3. Punto final donde se aloja la punta del catéter (diana): Se midió la distancia entre el punto ideal y el del sujeto.
4. Localización anatómica de la punta del catéter: Puede existir la posibilidad de que la punta del catéter se encontrara cerca de la diana óptima pero sin cumplir su función de drenaje, por lo que también estudiamos la supuesta localización anatómica en la que este quedaba alojado. En función de esta localización, dividimos cada uno de los procedimientos en exitoso (zona de

la diana óptima), posible (alguna parte del sistema ventricular) y no satisfactorio (fuera del sistema ventricular).

5. Distancia a la diana en el modo 'vista de trayectoria': Se midió la distancia entre el punto ideal y el de cada sujeto.
6. Área de confianza en la 'vista de trayectoria': Con la intención de estratificar los resultados de la trayectoria en grupos, se definieron 3 áreas de confianza: (A) distancia entre dianas < 4 mm, (B) distancia entre dianas de 4-8 mm y (C) distancia entre dianas > 8 mm.
7. Tiempo de ejecución.
8. Número de trayectorias.

Todos los resultados obtenidos de cada una de las variables estudiadas se recogen en una tabla de datos seudonimizada previamente elaborada, en la que se le asigna un número de "Plan" a cada participante. Se obtienen las medidas descriptivas de tendencia central y dispersión de cada grupo respecto a cada una de las variables analizadas. Para comparar los resultados en ambos grupos de la determinación del punto de entrada, longitud del catéter, tiempo de ejecución, distancia del catéter a diana y distancia del catéter a diana en 'vista de trayectoria' se aplica la distribución t (de Student) de evaluación de medias. Respecto al análisis del área de confianza, se comparan ambos grupos empleando la prueba χ^2 . El nivel de significancia estadística se estableció en $p < 0,05$.

RESULTADOS

Un total de 24 sujetos, divididos en dos grupos, participaron en el estudio.

Punto de entrada. La primera variable que se evaluó fue la capacidad de determinar el punto de Kocher sobre la piel del modelo físico a simple vista y sin ayuda de instrumentos para su medición. Respecto al grupo A, la distancia media del punto seleccionado al punto de Kocher fue de 19,37 mm con una desviación estándar de 11,29 mm, mientras que el grupo B obtuvo una distancia media de 10,28 mm y una desviación estándar de 6,48 mm. La comparación de las medias de ambos grupos muestra una diferencia estadísticamente significativa ($p = 0,02$; [1,29–16,88]). Tras esta fase, y sobre un modelo físico con la trepanación realizada, se les solicita a ambos grupos que realicen la colocación del DVE en base a los conocimientos y formación recibida. *Figura 5A*

Longitud del catéter introducido. Esta media no varió notablemente entre grupos, siendo la del grupo A de $5,44 \pm 1$ cm y de $5,92 \pm 0,48$ cm en el grupo B. La distribución en el primer grupo fue notablemente más dispersa, mientras que el grupo B mostró mayor homogeneidad, sin embargo, la diferencia entre medias no fue significativa ($p = 0,15$; [-1,14–0,19]). *Figura 5B*

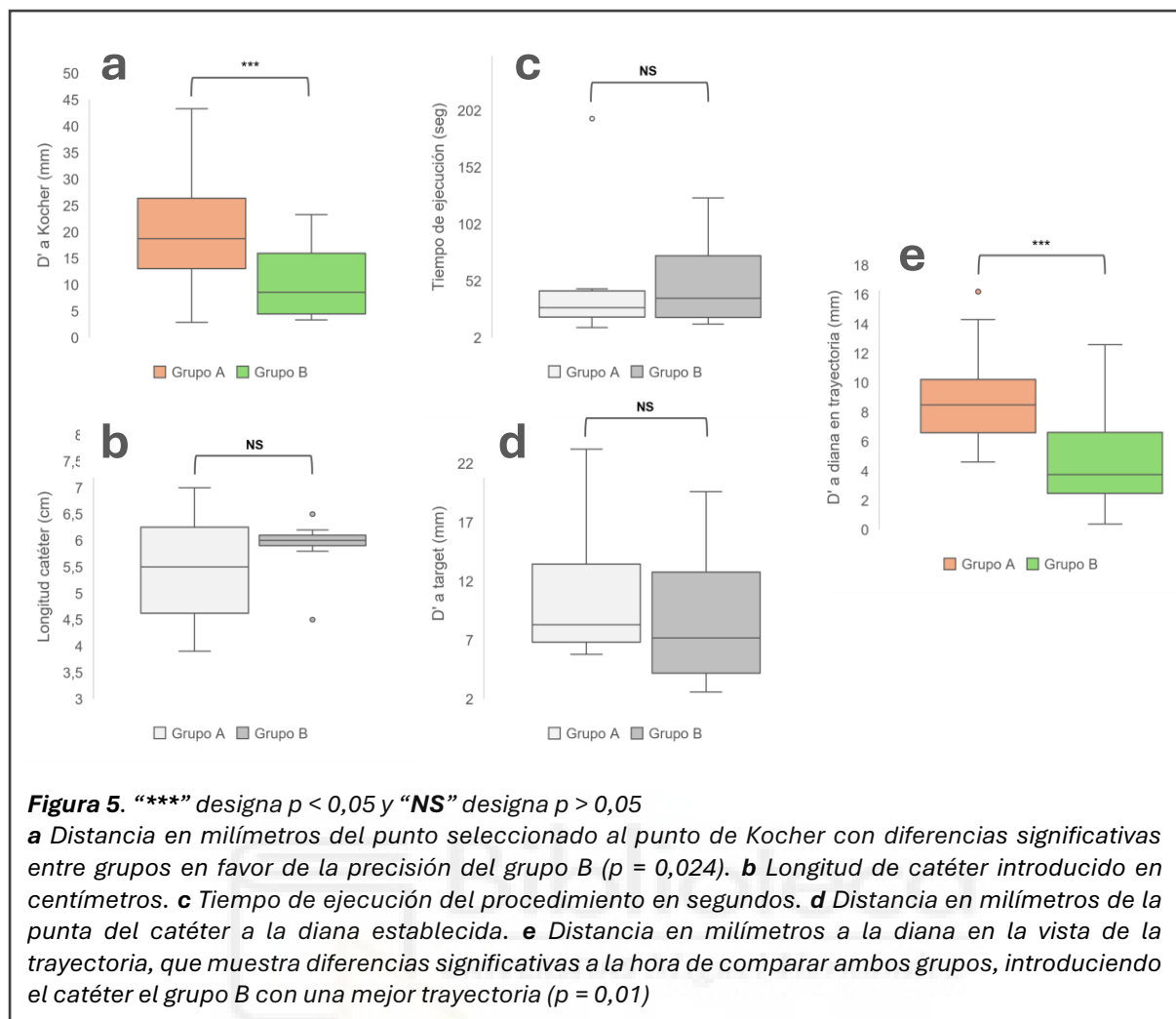
Distancia de la punta del catéter a la diana óptima. El grupo A se alejó una media de $11,17 \pm 7$ mm, a diferencia del grupo B, cuya distancia media se sitúa en 8,63 mm con una desviación estándar de 5,29 mm. Las diferencias entre grupos no resultaron estadísticamente significativas ($p = 0,33$; [-2,72–7,79]). *Figura 5D*

Tiempo de ejecución. Los participantes del grupo A invierten una media de $41,92 \pm 49,48$ segundos para llevar a cabo la colocación del DVE, el grupo B emplea una media de $51,75 \pm 38,15$ segundos en completar el procedimiento. El análisis de la diferencia de medias entre grupos respecto al tiempo invertido tampoco resultó significativa ($p = 0,59$; $[-47,24-27,57]$). *Figura 5C*

Se adjunta el análisis descriptivo de estas variables en *Tabla 1* y el estadístico en *Figura 5*.

Distancia de punto seleccionado a punto de Kocher				
Grupo (n)	Distancia media (mm)	Mediana (mm)	Desviación estándar (mm)	Varianza (mm ²)
A (12)	19,37	18,75	11,29	127,52
B (12)	10,28	8,6	6,48	42,02
Longitud de catéter introducido				
Grupo (n)	Longitud media (cm)	Mediana (cm)	Desviación estándar (cm)	Varianza (cm ²)
A (12)	5,44	5,5	1	0,99
B (12)	5,92	6	0,48	0,23
Distancia desde punta del catéter a diana				
Grupo (n)	Distancia media (mm)	Mediana (mm)	Desviación estándar (mm)	Varianza (mm ²)
A (12)	11,17	8,3	7	49,11
B (12)	8,63	7,2	5,29	27,98
Tiempo de ejecución				
Grupo (n)	Tiempo medio (seg)	Mediana (seg)	Desviación estándar (seg)	Varianza (seg ²)
A (12)	41,92	28,5	49,48	2448,08
B (12)	51,75	36,5	38,15	1455,48
Distancia a diana en modo 'vista de trayectoria'				
Grupo (n)	Distancia media (mm)	Mediana (mm)	Desviación estándar (mm)	Varianza (mm ²)
A (12)	8,98	8,5	3,39	11,51
B (12)	4,9	3,75	3,7	13,72

Tabla 1. Análisis estadístico descriptivo de las variables cuantitativas estudiadas.

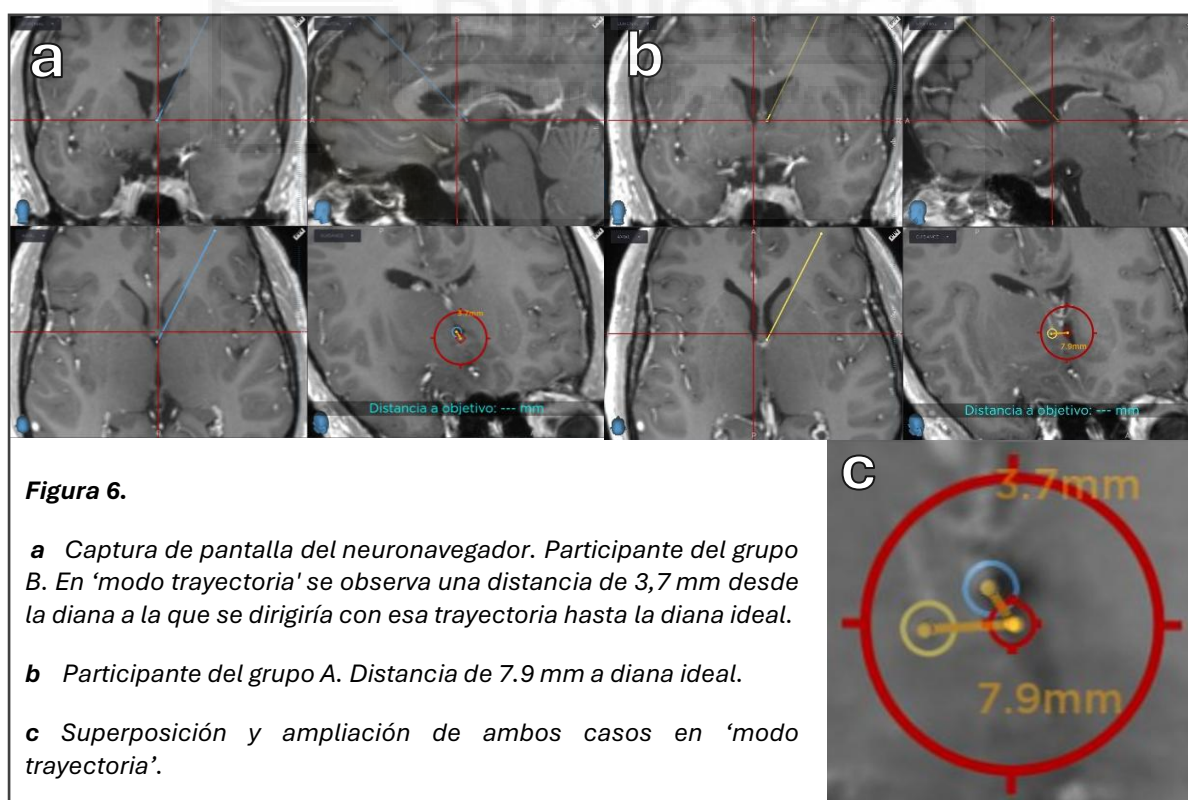


Localización anatómica de la punta del catéter. Únicamente 2 sujetos del grupo A (16,67%) realizaron un procedimiento exitoso, a diferencia de los 6 participantes (50%) que lo consiguieron del grupo B. En el primer grupo, 4 participantes (33,33%) canalizan el drenaje a lo largo del ventrículo lateral ipsilateral y el resto (6 participantes – 50%) en diferentes estructuras del parénquima cerebral. En cuanto al grupo B, los 6 participantes restantes realizan un procedimiento posible en ventrículo lateral ipsilateral, y ninguno coloca el drenaje en otras estructuras cerebrales. Con estos datos, aplicamos la prueba χ^2 y podemos concluir que existen diferencias significativas entre los resultados esperados y observados comparando ambos grupos con $p = 0,015$ (Tabla 2).

Grupo (n)	Drenaje exitoso	Drenaje posible	Drenaje no satisfactorio	Total
A (12)	2	4	6	12
B (12)	6	6	0	12
Total	8	10	6	24

Tabla 2. Resultados **observados** del éxito del procedimiento en función de la localización anatómica en la que se sitúa la punta del catéter.

Distancia a la diana en el modo ‘vista de trayectoria’. Atendiendo a la trayectoria que lleva cada uno de los catéteres, la distancia de estos a la diana en el modo ‘vista de trayectoria’ fue significativamente inferior en el grupo B (media de $4,9 \pm 3,7$ mm) respecto al grupo A (media de $8,98 \pm 3,39$ mm) con un valor de $p = 0,01$ e IC(95%) de [1,07–7,09] (Figura 5E). Ejemplo de dos participantes en Figura 6.



Área de confianza en la ‘vista de trayectoria’. Respecto al análisis de las áreas de confianza, se aplicó la prueba χ^2 que determinó la existencia de diferencias significativas entre la frecuencia esperada y observada de los distintos niveles de áreas (*Figura 7*) con $p = 0,0058$ (*Tabla 3*).

Grupo (n)	Confianza A (< 4 mm)	Confianza B (4 – 8 mm)	Confianza C (> 8 mm)	Total
A (12)	0	5	7	12
B (12)	7	3	2	12
Total	7	8	9	24

Tabla 3. Resultados **observados** de los catéteres situados en las áreas de confianza establecidas.

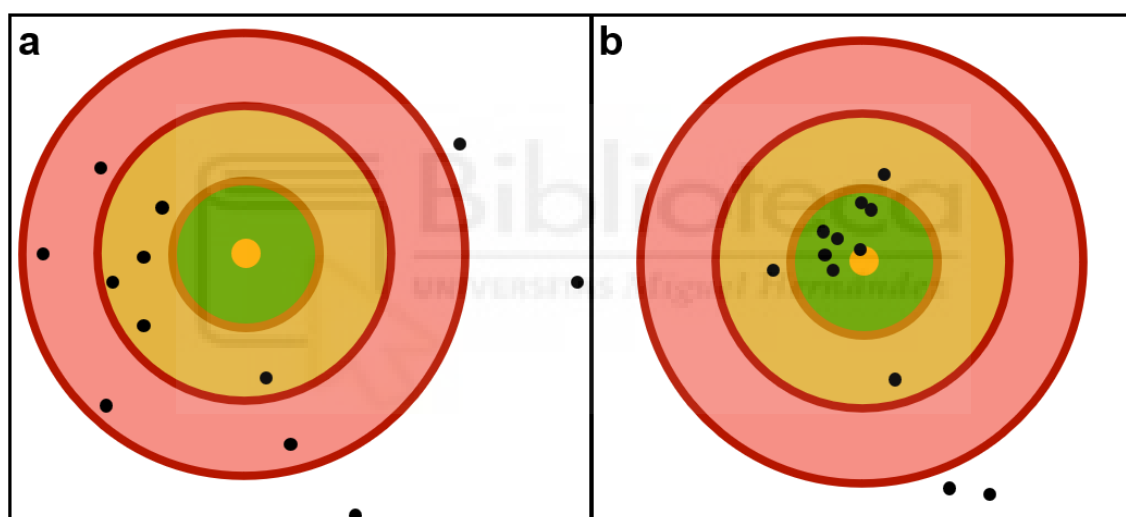


Figura 7. Recreación de las áreas de confianza para los sujetos del grupo A (a) y grupo B (b).

DISCUSIÓN

Con este trabajo, tratamos de validar un potencial método de entrenamiento basado en nuevas tecnologías en el ámbito de la neurocirugía, en concreto en la colocación de un DVE. Nuestra hipótesis sostenía que la simulación en un entorno virtual podría suponer un método más óptimo de formación en la técnica, comparándolo con la metodología tradicional. De hecho, el análisis de los resultados mostró la utilidad de la simulación con RV a la hora de incrementar la

precisión y calidad del drenaje, siendo significativas las diferencias entre grupos respecto a la localización del punto de Kocher, distancia del catéter a la diana en la vista de trayectoria y el área y localización en las que el drenaje quedaba alojado. Tanto la elección del punto de entrada como la distancia a la diana en modo ‘vista de trayectoria’ son variables tridimensionales. El hecho de que los participantes del grupo A obtengan resultados significativamente mejores nos hace pensar que la formación con RV facilita la orientación tridimensional.

Actualmente, sabemos que existe una curva de aprendizaje que supone todo un reto para los residentes de Neurocirugía y, como respuesta, se proponen diversos métodos de entrenamiento para tratar de facilitar esta formación ^[19]. En el caso del DVE, al tratarse de una técnica urgente y de vital importancia, un correcto entrenamiento previo es fundamental para tratar de mejorar la seguridad del paciente y conseguir los mejores resultados ^[20]. Los modelos más innovadores, que incluyen sistemas de realidad virtual con respuesta háptica, pese a simular con precisión lo que puede llegar a ser un procedimiento real, es un tipo de tecnología realmente cara de adquirir y mantener ^[17] cuanto a las técnicas guiadas mediante pruebas de imagen (TAC), también son métodos de coste alto, maquinaria que ocupa un gran espacio y presentan limitaciones para la imagen en tiempo real, así como suponer un retraso en el inicio del procedimiento por la demora en configurar el sistema ^[21]. Por esta razón, los simuladores de RV, como el utilizado en este estudio, adquieren especial relevancia como método educativo y de entrenamiento quirúrgico ^[22]. Estos son instrumentos que permiten la práctica habitual y repetitiva de la técnica en un entorno seguro, hechos que se han relacionado íntimamente con una mejor actuación a la hora de realizar un DVE ^[17].

Además, son instrumentos versátiles que pueden ser utilizados como parte del proceso preoperatorio en otro tipo de ámbitos, cirugías y especialidades [20,23].

Habitualmente, el éxito de la colocación de un DVE radica en la existencia de flujo de LCR de este hacia el exterior. Sin embargo, algunos estudios demuestran que hay un elevado porcentaje de ventriculostomías consideradas satisfactorias (en torno al 44%) en las que la punta del catéter no se sitúa en la diana óptima. De hecho, en hasta un 20% de los casos la localización final del catéter era externa al sistema ventricular [17]. Por este motivo, considerábamos importante analizar la distancia exacta a la diana, la trayectoria y la localización anatómica en la que se situaba el drenaje, no simplemente la supuesta salida o no de LCR. De hecho, aquellos drenajes considerados satisfactorios pero mal posicionados se relacionan con un aumento del coste, tiempo, pruebas diagnósticas, revisiones posteriores e incluso riesgo de daño cerebral [17].

En este estudio, se recogieron los intentos que realizaba cada uno de los participantes hasta decidir cuál iba a ser la localización definitiva de su drenaje. Se conoce que cada uno de los pasos del catéter puede suponer daño cerebral y mayor riesgo de complicaciones [17], sin embargo, estos datos fueron escasos y no suficientes como para su análisis posterior, ya que la mayoría de los sujetos (18 – 75%) llevaron a cabo el procedimiento en un único intento. Aunque no se detectan diferencias significativas entre grupos en cuanto al tiempo requerido para canalizar el drenaje ni a la longitud introducida, estas variables deberían considerarse como factores confusores a nivel individual. Cada sujeto invierte un tiempo e introduce una longitud de catéter diferente al resto, lo que puede estar relacionado con una

mayor o menor posibilidad de colocación satisfactoria del DVE. Al no haber controlado o ajustado estas variables para el análisis estadístico, deberían considerarse como parte de las limitaciones del estudio. Existen otro tipo de limitaciones que hemos detectado, tanto de tipo metodológico, como el tamaño muestral reducido ($n = 24$) o las diferencias que puedan existir entre el desempeño de la técnica y el curso académico o especialidad MIR que cursan; como de tipo tecnológico, por la ausencia de respuesta táctil, vibratoria o de fuerza del sistema de RV al atravesar ciertas estructuras.

CONCLUSIONES

Con este trabajo, tratamos de validar la simulación 3D con tecnología de RV como entrenamiento quirúrgico previo a la colocación de un DVE. Hemos obtenido resultados satisfactorios que evidencian una mayor precisión para localizar la entrada y canalizar el catéter sobre el grupo que recibe la formación clásica basada en referencias anatómicas y estudio de imágenes biplanares. La práctica habitual simulada del procedimiento quirúrgico puede suponer un impulso a la hora de avanzar en la curva de aprendizaje y traducirse en drenajes más precisos, rápidos y seguros desde una etapa temprana de la formación en la especialidad. Estos procedimientos satisfactorios se traducen en un alivio de los síntomas y menor riesgo de complicaciones como hemorragias, infecciones o bloqueos. Consideramos fundamental que futuros estudios contemplen el uso de realidad virtual o aumentada como parte del entrenamiento quirúrgico habitual en la realización de ventriculostomías, estudiando a un mayor número de participantes y durante un intervalo prolongado de tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Puellas López L, Martínez Pérez S, Martínez de la Torre M. Neuroanatomía. 2008 [cited 2025 Feb 3];Available from: <https://www.casadellibro.com/libro-neuroanatomia/9788479034535/1193799>
2. Fix JD, Harvey DM, Fontán Fontán F. Neuroanatomía / James D. Fix ; colaborador, Deon M. Harvey ; traducción, Fernando Fontán Fontán. 4a. edición. Estados Unidos: Wolters Kluwer Health; 2013.
3. Carpenter MB. Neuroanatomía. Cuarta. Editorial Médica Panamericana; 1994.
4. Noback CR, Strominger NL, Demarest RJ, Ruggiero DA. The human nervous system: Structure and function: Sixth edition. The Human Nervous System: Structure and Function: Sixth Edition 2005;1–477.
5. Hutton D, Fadelalla MG, Kanodia AK, Hossain-Ibrahim K. Choroid plexus and CSF: an updated review. Br J Neurosurg [Internet] 2022 [cited 2025 Mar 6];36(3):307–15. Available from: <https://pubmed-ncbi-nlm-nih-gov.publicaciones.umh.es/33821737/>
6. Czarniak N, Kamińska J, Matowicka-Karna J, Koper-Lenkiewicz OM. Cerebrospinal Fluid–Basic Concepts Review. Biomedicines [Internet] 2023 [cited 2025 Mar 6];11(5):1461. Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10216641/>
7. Langner S, Fleck S, Baldauf J, Mensel B, Kühn JP, Kirsch M. Diagnosis and Differential Diagnosis of Hydrocephalus in Adults. Rofo [Internet] 2017 [cited 2025 Mar 20];189(8):728–39. Available from: <https://pubmed-ncbi-nlm-nih-gov.publicaciones.umh.es/28511266/>
8. Mokri B. The Monro-Kellie hypothesis: applications in CSF volume depletion. Neurology [Internet] 2001 [cited 2025 Mar 20];56(12):1746–8. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11425944/>
9. Hochstetler A, Raskin J, Blazer-Yost BL. Hydrocephalus: historical analysis and considerations for treatment. Eur J Med Res [Internet] 2022 [cited 2025 Mar 13];27(1). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36050779/>
10. Carswell C. Idiopathic normal pressure hydrocephalus: historical context and a contemporary guide. Pract Neurol [Internet] 2023 [cited 2025 Mar 20];23(1):15–22. Available from: <https://pn.bmj.com/content/23/1/15>
11. Kitagaki H, Mori E, Ishii K, Yamaji S, Hirono N, Imamura T. CSF spaces in idiopathic normal pressure hydrocephalus: morphology and volumetry. American Journal of Neuroradiology 1998;19(7).

12. Mostofi K, Khouzani RK. Surface anatomy for implantation of external ventricular drainage: Some surgical remarks. *Surg Neurol Int* [Internet] 2016 [cited 2025 Apr 12];7(Suppl 22):S577–80. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27625894/>
13. Bertuccio A, Marasco S, Longhitano Y, Romenskaya T, Elia A, Mezzini G, et al. External Ventricular Drainage: A Practical Guide for Neuro-Anesthesiologists. *Clin Pract* [Internet] 2023 [cited 2025 Apr 8];13(1):219. Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9955739/>
14. Sharma N, Head JR, Mallela AN, Shanahan RM, Canton SP, Abou-Al-Shaar H, et al. Single institution series describing external ventricular drain (EVD) placement and short- and long-term complications related to placement accuracy. *Surg Neurol Int* [Internet] 2024 [cited 2025 Apr 12];15. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38468651/>
15. Lee KS, Zhang JJY, Bole N, Leong ML, Goh CP, Hassan R, et al. Freehand Insertion of External Ventricular Drainage Catheter: Evaluation of Accuracy in a Single Center. *Asian J Neurosurg* [Internet] 2020 [cited 2025 Apr 12];15(1):45. Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7057862/>
16. Morone PJ, Dewan MC, Zuckerman SL, Shane Tubbs R, Singer RJ. Craniometrics and Ventricular Access: A Review of Kocher's, Kaufman's, Paine's, Menovksy's, Tubbs', Keen's, Frazier's, Dandy's, and Sanchez's Points. *Oper Neurosurg (Hagerstown)* [Internet] 2020 [cited 2025 Apr 17];18(5):461–9. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31420653/>
17. Perin A, Galbiati TF, Gambatesa E, Ayadi R, Orena EF, Cuomo V, et al. Filling the gap between the OR and virtual simulation: a European study on a basic neurosurgical procedure. *Acta Neurochir (Wien)* [Internet] 2018 [cited 2025 May 5];160(11):2087–97. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30276545/>
18. Seymour NE, Gallagher AG, Roman SA, O'Brien MK, Bansal VK, Andersen DK, et al. Virtual reality training improves operating room performance results of a randomized, double-blinded study. *Ann Surg* [Internet] 2002 [cited 2025 May 5];236(4):458–64. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12368674/>
19. Hopper AN, Jamison MH, Lewis WG. Learning curves in surgical practice. *Postgrad Med J* [Internet] 2007 [cited 2025 May 8];83(986):777–9. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18057179/>
20. Schirmer CM, Mocco J, Elder JB. Evolving virtual reality simulation in neurosurgery. *Neurosurgery* [Internet] 2013 [cited 2025 May 8];73(SUPPL. 4). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24051876/>
21. Huyette DR, Turnbow BJ, Kaufman C, Vaslow DF, Whiting BB, Oh MY. Accuracy of the freehand pass technique for ventriculostomy catheter placement: Retrospective assessment using computed tomography scans. *J Neurosurg*

- [Internet] 2008 [cited 2025 May 8];108(1):88–91. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18173315/>
22. Rossitto CP, Odland IC, Oemke H, Cruz D, Kalagara R, Schupper AJ, et al. External Ventricular Drain Training in Medical Students Improves Procedural Accuracy and Attitudes Toward Virtual Reality. *World Neurosurg* [Internet] 2023 [cited 2025 May 9];175:e1246–54. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37149087/>
23. Kin T, Nakatomi H, Shono N, Nomura S, Saito T, Oyama H, et al. Neurosurgical Virtual Reality Simulation for Brain Tumor Using High-definition Computer Graphics: A Review of the Literature. *Neurol Med Chir (Tokyo)* [Internet] 2017 [cited 2025 May 8];57(10):513. Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5638778/>

