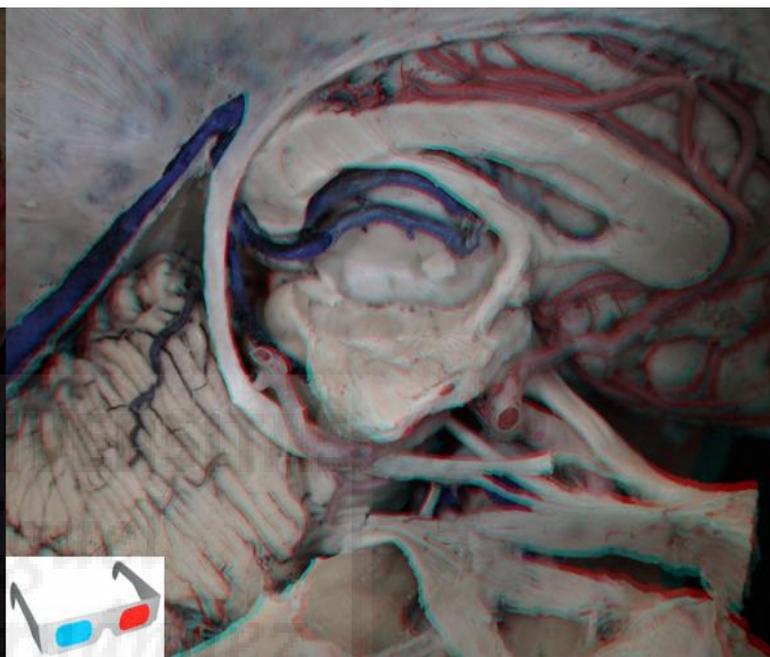
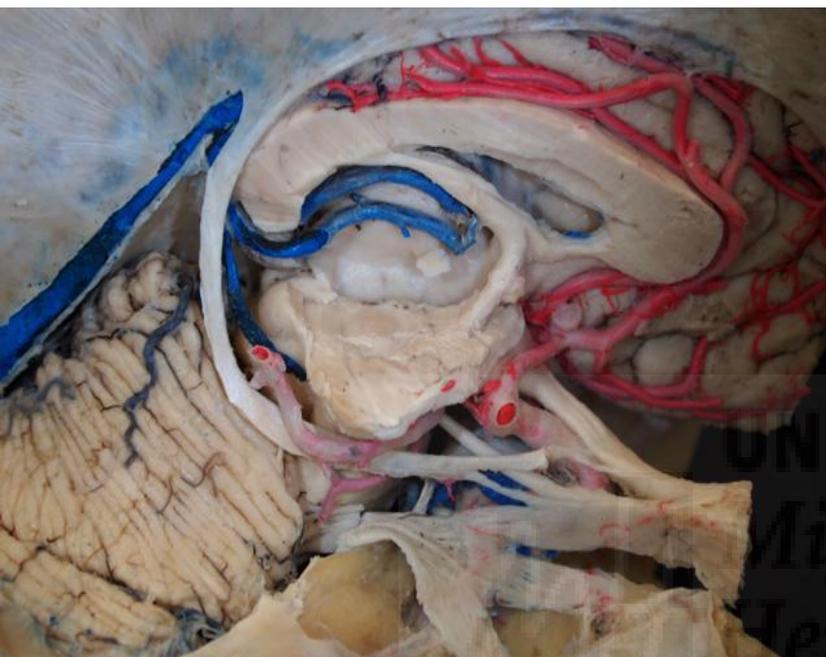


UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ



UNIVERSITAS
Miguel
Hernández



TESIS DOCTORAL

LA VISIÓN 3D-ESTEREOSCÓPICA EN EL APRENDIZAJE DE LA
NEUROANATOMÍA QUIRÚRGICA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN NEUROCIENCIAS

AUTOR

JAVIER ABARCA OLIVAS

DIRECTOR

DR DIEGO ECHEVARRIA AZA

CO-DIRECTOR

DR FRANCISCO SANCHEZ DEL CAMPO





UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ

PROGRAMA DE DOCTORADO DE NEUROCIENCIAS

coordinador: Miguel Angel Valdeolillos López

Centro de realización: Facultad de Medicina. DEPARTAMENTO DE HISTOLOGÍA Y ANATOMÍA



LA VISIÓN 3D-ESTEREOSCÓPICA EN EL APRENDIZAJE DE LA NEUROANATOMÍA QUIRÚRGICA **TESIS DOCTORAL**

AUTOR:

Javier Abarca Olivas
Licenciado en Medicina

DIRECTOR Y TUTOR:

DIEGO ECHEVARRIA AZA
Profesor titular

CO-DIRECTOR:

FRANCISCO SANCHEZ DEL CAMPO
Profesor emérito



Director: DIEGO ECHEVARRIA AZA
Co-director: FRANCISCO SANCHEZ DEL CAMPO

CERTIFICAN:

Que el licenciado JAVIER ABARCA OLIVAS ha realizado la tesis: "LA VISIÓN 3D-ESTEREOSCÓPICA EN EL APRENDIZAJE DE LA NEUROANATOMÍA QUIRÚRGICA" íntegramente baso su estricta dirección.

En Alicante a 13 de Junio de 2018.



Fdo Diego Echevarria Aza

Fdo Francisco Sánchez Del Campo



AGRADECIMIENTOS

La presente tesis es el fruto del trabajo realizado durante 7 años en el laboratorio de anatomía de la Facultad de Medicina de San Juan (Universidad Miguel Hernández) y en el departamento de Neurocirugía del Hospital General Universitario de Alicante.

Mi inquietud por la divulgación de la neuroanatomía se despierta gracias al impulso de los doctores Jaime Lloret y Francisco Sánchez-Del Campo del Departamento de Histología y Anatomía que desde el principio me han motivado y ayudado a llevar a cabo este proyecto. Su director Eduardo Fernández me ha permitido trabajar libremente en sus instalaciones.

He de destacar el cualificado trabajo de los técnicos de laboratorio de la sala de disección: Alfonso y Paola que nos preparan los especímenes y nos mantienen las instalaciones en perfectas condiciones para poder desarrollar el trabajo de disección.

El origen de mi interés por la neuroanatomía y su divulgación en formato estereoscópico se lo debo a dos personas: Javier Márquez (jefe de servicio de neurocirugía del Hospital Virgen del Rocio de Sevilla) y a Juan Carlos Fernández Miranda (Jefe del laboratorio de Neuroanatomía de la Universidad de Pittsburgh en EEUU). El primero es el pionero en España en la organización de cursos de Neuroanatomía 3d. Con Juan Carlos tuve la oportunidad de compartir dos inolvidables meses en su laboratorio donde aprendí las técnicas de disección y la adquisición de fotografía 3d. Aquella estancia la compartí con mi amigo y paisano Eugenio Cárdenas que siempre me ha ayudado tanto en el terreno profesional como personal.

He contado con el apoyo de mi jefe, el Dr Pedro Moreno, que además de mi profesor en la práctica de la especialidad me ha permitido dedicar tiempo a la difícil tarea de la investigación.

Durante la realización de la tesis he contado con la ayuda de compañeros y amigos sin los cuales no podría haber llevado a cabo el trabajo. Irene Monjas, otorrinolaringóloga del Hospital de Alicante me ha ayudado enormemente a nivel quirúrgico e investigador en el área de la base de cráneo. Pablo González, compañero neurocirujano, ha sido un referente para mí desde su llegada a Alicante en 2012. Su enorme capacidad de trabajo, sus conocimientos adquiridos durante sus estancias previas en laboratorios de anatomía y , sobre todo, la amistad que me ha unido a él me han permitido mejorar como cirujano y como investigador. Junto con Pablo, el Dr. Víctor Fernández ha conseguido que formáramos desde hace 5 años un equipo de trabajo que tiene como objetivo la divulgación de la neuroanatomía en formato 3d tanto a nivel nacional como internacional. Este proyecto llamado “3dneuroanatomy” nos ha permitido colaborar con diferentes sociedades de neurocirugía permitiéndonos hacer excelentes contactos que nos han servido para mejorar nuestro material. No me olvido de los residentes que tantas horas han compartido conmigo en el laboratorio, en especial Iván Verdú que me ayudó a encontrar la solución a múltiples problemas tecnológicos que nos han surgido.

Por supuesto agradecer a Diego Echevarría el tiempo y esfuerzo empleado para la dirección y tutoría de la presente tesis.

De forma especial, mi agradecimiento para mi mujer Sara y mis hijos por el apoyo emocional y la paciencia por haberles robado tantas horas de mi tiempo.

INDICE

1-REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS FUNDAMENTALES.....	13
2-RESUMEN / ABSTRACT.....	15
3-INTRODUCCIÓN.....	23
3.1 Historia de la neuroanatomía y su enseñanza.....	24
3.2 La disección en cadáver.....	31
3.3 Nuevos métodos de enseñanza anatómica basados en la tecnología.....	35
3.4 Principios básicos de la visión estereoscópica.	42
3.5 Historia de la visión estereoscópica y su aplicación en la docencia de la neuroanatomía.....	56
3.6 Planteamiento actual del problema.....	66
4-HIPOTESIS DE TRABAJO Y OBJETIVOS.....	69
4.1 Hipótesis fundamental.....	69
4.2 Objetivos generales.	69
4.3 Objetivos específicos.	70
5-MATERIAL Y MÉTODO.....	71
5.1 Material y métodos de captura.....	71
5.1.1 Laboratorio de anatomía.....	71
5.1.2 Especímenes cadavéricos: preparación.....	74
5.1.3 Material de captura de imágenes esteoscópicas.....	79
5.1.4 Métodos de captura de imagen.....	90
*Fotografía de piezas anatómicas aisladas.....	90
*Fotografía de abordajes microquirúrgicos.....	94
*Fotografía de abordajes endoscópicos.....	99
5.2 Material y métodos de proyección o impresión 3d.....	102
5.2.1 Método de proyección/impresión en anáglifo.....	102
5.2.2 Método de proyección/impresión en sistema polarizado.....	103
6-RESULTADOS.....	111
6.1 Material gráfico obtenido.....	111
6.1.1 Osteología nasal y de base de cráneo.....	113
6.1.2 Relación de puntos craneométricos con superficie cerebral..	117
6.1.3 Anatomía de la superficie y de la sustancia blanca cerebral..	121

6.1.4 Anatomía del sistema ventricular.....	125
6.1.5 Anatomía de la órbita.....	129
6.1.6 Anatomía del abordaje endonasal transesfenoidal.....	133
6.1.7 Anatomía quirúrgica del abordaje lateral supraorbitario.....	138
6.1.8 Anatomía quirúrgica del abordaje anterior interhemisférico transcalloso al sistema ventricular.....	142
6.1.9 Anatomía del abordaje retrosigmoideo al ángulo pontocerebeloso.....	147
6.1.10 Anatomía del abordaje infratentorial supracerebeloso a la glándula pineal.....	151
6.1.11 Anatomía quirúrgica de la región supraselar y del seno cavernoso.....	155
6.1.12 Anatomía quirúrgica del raquis.....	159
6.2 Aceptación del método de aprendizaje por estereoscopia 3D.....	165
7-DISCUSIÓN.....	171
7.1 Utilidad de la estereoscopia en la docencia de la neuroanatomía..	171
7.2 Aportación de la tesis en relación a otros autores y aplicabilidad de la técnica.....	173
7.3 Ventajas y desventajas de las técnicas.....	178
7.4 Limitaciones de la visión estereoscópica.....	182
8-CONCLUSIONES.....	185
9-BIBLIOGRAFÍA.....	187
10-ANEXO.....	195
10.1 Referencia fundamental Num 1.....	195
10.2 Referencia fundamental Num 2.....	228

MATERIAL ADICIONAL : GAFAS ANAGLIFO.

1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FUNDAMENTALES

- **García-Garrigós E, Arenas-Jiménez JJ, Monjas-Cánovas I, Abarca-Olivas J, Cortés-Vela JJ, De La Hoz-Rosa J, Guirau-Rubio MD. Transsphenoidal Approach in Endoscopic Endonasal Surgery for Skull Base Lesions: What Radiologists and Surgeons Need to Know. Radiographics. (Q2) 2015 Jul-Aug;35(4):1170-85. doi:10.1148/rg.2015140105. Review. PubMed PMID: 26046941.**
- **Abarca-Olivas J, Monjas-Cánovas I, López-Álvarez B, Lloret-García J, Sanchez-del Campo J, Gras-Albert JR, Moreno-López P. [Three-dimensional endoscopic endonasal study of skull base anatomy]. Neurocirugia (Astur). (Q4). 2014 Jan-Feb;25(1):1-7. doi: 10.1016/j.neucir.2013.02.009. Spanish. PubMed PMID: 24447642.**

Mas información sobre las referencias en Capítulo 10 (Anexo–pag 189)
10-1 y 10-2 Contenido completo de dichas referencias.



2. RESUMEN/ABSTRACT

RESUMEN

Introducción

A lo largo de la historia , la neuroanatomía humana ha experimentado un desarrollo siempre ligado al contexto social , cultural, religioso y tecnológico de cada época . La vía de estudio de la anatomía más determinante durante siglos ha sido el estudio del cadáver . Sin embargo , su uso como método de investigación y docencia no ha sido fácil por problemas socio-culturales diversos . En los últimos años el desarrollo de la tecnología informática ha aportado nuevas herramientas en el aprendizaje de la anatomía. La estereoscopia es el fenómeno por el cual se representa un objeto ante nosotros de forma tridimensional mediante el uso de imágenes dobles que simulan las percibidas de forma fisiológica por cada uno de nuestros ojos. Esa herramienta va a tener utilidad en el campo de la anatomía a la hora de mostrar de forma simulada estructuras anatómicas con su volumen y profundidad reales sin necesidad de que éstas estén ante el espectador.

Hipótesis

La aplicación de la estereoscopia en la neuroanatomía básica, académica y clínica es una herramienta útil para su aprendizaje. La

unificación en un trabajo de todos éstos métodos permitiría hacer reproducible este modo de enseñanza en otros centros y por tanto facilitar el aprendizaje de la neuroanatomía básica, académica y quirúrgica.

Objetivos

La finalidad de esta tesis es describir la técnica necesaria para adquirir las imágenes estereoscópicas en las diferentes modalidades de visualización neuroquirúrgica así como el modo de proyectarlas.

Se pretende además mostrar en imágenes el producto obtenido con la aplicación de estas técnicas, sus ventajas y su aplicabilidad en la docencia e investigación de la neuroanatomía.

Material y Métodos

Durante los últimos 6 años se lleva a cabo en la sala de disección de la Facultad de Medicina de la Universidad Miguel Hernández la disección con enfoque quirúrgico de piezas anatómicas tratadas con formol, método Thiel, método Klinger o cráneos secos. Se realizan capturas fotográficas con el uso de una cámara 2D y un microscopio convencional. Se utilizan sistemas de fijación de la cámara fotográfica que permiten deslizamientos horizontales para la captura estereoscópica así como diferentes métodos de iluminación. La técnica de adquisición de fotografías estereoscópicas es descrita en diferentes ámbitos de la neuroanatomía quirúrgica.

Los métodos de visualización de las imágenes obtenidas han sido el método anáglifo y el polarizado. Se describen los detalles técnicos relacionados con su edición y proyección.

Resultados

Se exponen de forma ordenada ejemplos de fotografías de diferentes regiones anatómicas y abordajes de interés neuroquirúrgico. Para ello se muestran las imágenes en formato 2d con edición de texto sobreimpreso y al lado de cada una de ellas la correspondiente fotografía en formato anáglifo para su visualización con las gafas apropiadas. En la lectura de tesis estas fotografías se mostrarán mediante el método de proyección con luz polarizada.

Se aportan además datos que apoyan la aceptación del trabajo obtenido y que ha sido mostrado a lo largo de los últimos 5 años en soporte web y mediante su proyección en cursos de neuroanatomía quirúrgica. La valoración de las ponencias sobre neuroanatomía impartidas en formato 3d resultó significativamente superior a las impartidas en 2d.

Discusión

En este apartado disertamos sobre:

- Utilidad de la estereoscopia en la docencia de la neuroanatomía
- Aportación de la tesis en relación a otros autores y aplicabilidad de la técnica
- Ventajas y desventajas de las técnicas
- Limitaciones de la visión estereoscópica

Conclusiones

El aprendizaje de la neuroanatomía básica, académica y clínica mediante la proyección de fotografías y videos estereoscópicos puede

ser útil como método docente. Esta herramienta gana valor si se usa como complemento a otros métodos ya consolidados. La valoración positiva y significativamente superior de las sesiones de docencia impartidas en formato 3D respecto a las 2D avala nuestra hipótesis.

Los métodos de captura de imágenes y de proyección estereoscópicas en neuroanatomía, una vez adquiridos los conocimientos teóricos y prácticos necesarios, pueden ser reproducidos en otros centros de enseñanza de neuroanatomía.

ABSTRACT

Introduction

Throughout history, human neuroanatomy has undergone a development always linked to the social, cultural, religious and technological context of each era. The cadaveric specimens have been the most determining teaching method to study anatomy during centuries. However, its use as a method of research and teaching has not been easy due to diverse socio-cultural problems. In recent years the development of computer technology has provided new teaching tools. Stereoscopy is the phenomenon by which an object is showed to our eyes in three-dimensional form by using double images that simulate those perceived physiologically by each eye. This tool is going to be useful in the field of anatomy because allow us to see in a simulating way the anatomical structures with their real volume and depth.

Hypothesis

The application of stereoscopy in basic, academic and clinical neuroanatomy is a useful tool for learning. The compilation of all these methods of 3d vision in this thesis would make possible to reproduce this teaching mode in other centers and therefore facilitate the learning of basic, academic and surgical neuroanatomy.

Objetives

The purpose of this thesis is to describe the different techniques to acquire the stereoscopic images in the different modalities of neurosurgical visualization as well as the way of projecting them.

Another goal of our thesis is to show the images obtained with the application of these techniques, their advantages and their applicability in the teaching and research of neuroanatomy.

Material and methods

During the last 6 years the dissection with surgical perspective of anatomical specimens treated with formaldehyde, Thiel and Klinger methods has been performed in the anatomical laboratory of the Faculty of Medicine (University Miguel Hernández). Photographic captures are made with the use of a 2D camera and a conventional microscope. Camera fixation systems that allow horizontal slides for stereoscopic capture as well as different lighting methods have been used. The technique to take stereoscopic pictures is described in different fields of surgical neuroanatomy.

The methods of visualization of the obtained images have been the anaglyph and the polarized method. The technical details related to its edition and projection are described.

Results

Examples of photographs of different anatomical regions and approaches of neurosurgical interest are presented. To do this, the images are shown in 2d format edited with some explanatory labels over them. Next to them the corresponding 3d photograph in anaglyph format is showed to be seen with the anaglyph glasses (additional material). In the final lecture of the thesis these photographs will be projected using the polarized method.

We also provide data that certify the acceptance of the work obtained that has been shown over the last 5 years in web support and through its projection in surgical neuroanatomy courses. The neuroanatomy lectures both in 2d and 3d format have been evaluated by our course participants and the 3d way has been significantly better accepted.

Discussion

In this section we discuss:

- Utility of stereoscopy in the teaching of neuroanatomy
- Contribution of the thesis in relation to other authors and applicability of the technique
- Advantages and disadvantages of techniques.
- Limitations of stereoscopic vision.

Conclusions

The learning of basic, academic and clinical neuroanatomy through the projection of stereoscopic photographs and videos can be useful as a teaching method. This tool gains value used as a complement to other methods already consolidated. The positive and significantly higher evaluation of the teaching lectures in 3D format compared with the 2d format supports our hypothesis.

The methods of image capture and stereoscopic projection in neuroanatomy, once acquired the necessary theoretical and practical knowledge, can be reproduced in other centers of neuroanatomy teaching.





3. INTRODUCCIÓN

Vivimos en un mundo en 3D. Todos los objetos presentes ante nosotros tienen una profundidad y guardan unas distancias unos de otros respecto a nosotros. El órgano de la visión está basado en la existencia de dos ojos. Esto no es un capricho de la naturaleza. Las imágenes capturadas por el ojo izquierdo son ligeramente diferentes a las capturadas por el ojo derecho. Esto se debe a la distancia que existe entre ambos. Las imágenes capturadas por cada uno de ellos llega al córtex visual y se integra como una sola imagen¹⁻³. Dicha imagen tiene la peculiaridad de hacernos percibir la profundidad de los objetos que tenemos ante nosotros, la distancia que existe entre varios elementos presentes ante nosotros en el campo visual. Este principio tan elemental en nuestra vida cotidiana recibe el nombre de visión estereoscópica. En cualquier aspecto de la vida, cuando hemos de aprender una actividad y no es posible tenerla a nuestro alcance, la forma más efectiva de hacerlo es simular dicha actividad de la forma más parecida posible a la realidad. Uno de los aspectos más importantes para que la simulación se parezca al máximo a la realidad a imitar es mostrar ésta en 3D.⁴

Cuando pensamos en la Neuroanatomía y su enseñanza vemos como existen métodos que nos permiten visualizar directamente el cuerpo humano y en concreto el sistema nervioso central: principalmente la disección de cadáveres, el uso de modelos sintéticos, la contemplación de cirugías o la inspección del cuerpo humano vivo en pacientes o voluntarios sanos. Sin embargo, estos métodos no siempre están al alcance de todos los alumnos de neuroanatomía. Como en cualquier

disciplina del conocimiento, el material docente más asequible desde el punto de vista de disponibilidad y recursos económicos es el material gráfico impreso o proyectado. Como es lógico, el material gráfico del que hemos dispuesto clásicamente para su enseñanza ha sido en 2D. Esta disparidad con la realidad del sistema nervioso entendida como una estructura espacial interconectada y cuyo abordaje quirúrgico requiere el uso de vías anatómicas profundas, a llevado a que, desde hace menos de un siglo, se haya tratado de aplicar la estereoscopia a la enseñanza y divulgación de la anatomía y la neuroanatomía en particular⁵⁻⁷.

En esta tesis doctoral hacemos una revisión sobre la aplicación de la estereoscopia en el aprendizaje de la anatomía quirúrgica del sistema nervioso central.

3.1 Historia de la Neuroanatomía y su enseñanza.

No podríamos empezar a hablar sobre la docencia actual en esta materia sin antes recordar cómo se han desarrollado los hitos más importantes de la Neuroanatomía a lo largo de la humanidad y el modo en que los métodos de enseñanza han evolucionado hasta el día de hoy.

La anatomía humana constituye una de las materias fundamentales de la Medicina a lo largo de la historia. A su vez, la anatomía del sistema nervioso o Neuroanatomía ha constituido un reto desde el punto de vista de su investigación y, del mismo modo, en lo que a su enseñanza respecta.

Las primeras descripciones sobre la anatomía del sistema nervioso datan de la civilización Egipcia. Dicha información procedía de animales muertos, traumatismos durante la guerra o accidentes

durante las construcciones. Durante el embalsamamiento el cerebro se extraía a través del agujero magno o del etmoides con un gancho. La primera mención literal al cerebro se hace en el célebre papiro de Edwin Smith que data de hace más de 3500 años. En él se dice que cuando se producía un traumatismo con apertura del cráneo, se visualizaba el cerebro como una masa arrugada parecida al cobre fundido. Esta breve descripción va acorde con la falta de importancia otorgada al cerebro durante esta civilización. El corazón era por aquél entonces el centro de control del cuerpo humano⁸.

Es Hipócrates, considerado el padre de la Medicina (460-370 a. C.) durante la civilización griega el primero en dar un carácter natural y científico a las enfermedades y en situar al cerebro como elemento controlador del cuerpo.

En su célebre Corpus Hippocraticum asocia lesiones en la cabeza con trastornos del movimiento e incluso las sitúa en el lado contrario del cuerpo.⁹

Tras la muerte de Alejandro Magno se desarrolla la Escuela Alejandrina. Ptolomeo funda la famosa biblioteca reuniendo todos los manuscritos sobre artes y ciencias de la época. Dicha escuela tuvo gran influencia en la historia del desarrollo de la Neuroanatomía dado que se permitió la disección en cadáver humano. Uno de los miembros más destacados fue Herófilo de Calcedonia que describió la corteza cerebral, la médula espinal como parte del sistema nervioso central, los cuatro ventrículos, los nervios ópticos, las meninges y los senos venosos. Fue además el primero en hacer una disección en público según las fuentes recogidas.¹⁰

Durante el Imperio Romano, destacó Galeno de Pérgamo (130-200 d. C.). Sus aportaciones estuvieron basadas en la disección de animales, ya que desde al año 30 d. C se prohibió la práctica de la disección en

humanos. A pesar de ello fue un adelantado describiendo estructuras cerebrales que muchos siglos más tarde serían descritas: el acueducto de Silvio, el foramen de Monro, el cuerpo calloso o la glándula pineal. Nombró los pares craneales que en su primera descripción fueron siete. Además describió los nervios espinales, la musculatura ocular y los nervios recurrente y frénico.¹¹

Durante la Edad Media se distinguen dos modos de entender la Neuroanatomía: la defendida por Herófilo según el cual la mente y el pensamiento partían de los ventrículos. Por otro lado la teoría de Galeno que atribuye la mente al propio tejido cerebral.

Las técnicas de disección experimentan un empuje con la figura de Constancio Valorio (1543-1575) que describe la extracción sistematizada del cerebro de la cavidad craneal y su estudio.

Andrea Vesalio (1514-1564) publica su célebre *De humani corpori fabrica libri septem* donde corrige las imprecisiones de la obra de Galeno¹².

Más tarde, Thomas Willis (1621-1675) describe la anatomía de los ganglios de la base así como la vascularización cerebral básica y su intercomunicación¹³. Morgagni (1682- 1771) describe la asociación de lesiones cerebrales con sus manifestaciones clínicas. Es considerado por tanto el padre de la Neuroanatomía clínica. François de la Boë conocido como Syivius (1614-1672) describe las dos estructuras que llevan su nombre: la Cisura que separa el lóbulo frontal del temporal y el conducto que une el tercer y cuarto ventrículos.

El desarrollo del microscopio marca un punto de inflexión en el estudio de la Neuroanatomía. Hasta entonces basada en la descripción de su superficie interna y externa, ahora se producirá una revolución en el entendimiento de su fisiología acompañado del desarrollo de la Histología y Neurobiología celular y molecular. Es Robert Hooke

(1635-1703) el primero en describir la célula como unidad básica de vida. Monro (1697-1767) describe la estructura interna del cerebro. Gall y Gaspar diferencian el funcionamiento de la sustancia blanca y la sustancia gris.

Durante el siglo XIX se siguen realizando importantes aportaciones, en especial en relación a la neurofisiología celular.

Theodor Schwann (1810-1882) fue uno de los fundadores de la teoría celular y descubridor de la vaina que rodea las células nerviosas y que lleva su nombre. Augustus Waller describe el efecto trófico de los somas nerviosos sobre los axones. Theodor Meynert descubre el funcionamiento de estructuras cerebrales como el hipocampo y el bulbo olfatorio. Luwing Turk describe la existencia de un haz piramidal a nivel ventral en la médula espinal. Camilo Golgi desarrolla la tinción con nitrato de plata que permite caracterizar componentes dentro de la célula nerviosa.

La escuela neuroanatómica española merece una mención especial en esta época de finales del siglo XIX y principios del siglo XX. La figura más eminente fue Ramón y Cajal (1852-1934), ganador del Premio Nobel en 1906 por establecer el concepto actual de neurona y su funcionamiento. Río Hortega fue también un importante neurohistólogo que utilizando nuevas técnicas de tinción descubrió la oligodendroglía y la microglía. Nombrar además a Rafael Lorente de No que contribuyó a describir la anatomía del núcleo vestibular y la división topográfica del hipocampo. ^{14,15}.

Durante el siglo XX y hasta la actualidad se puede destacar que el avance más importante ha tenido lugar en el campo de la genética y la química básica del cerebro. El estudio de sus interconexiones y la función de cada estructura cerebral ha resultado crucial no sólo para un

conocimiento más funcional de la neuroanatomía sino para el mejor manejo de las enfermedades relacionadas con el sistema nervioso.

Del mismo modo, cabe destacar el enorme avance tecnológico de las últimas décadas en el campo de la neuroimagen (resonancia magnética, tomografía computarizada, técnicas de imagen basadas en medicina nuclear o tractografía, que han conducido en un mejor conocimiento de la anatomía. Además, los avances tecnológicos en el campo de la medicina y cirugía han permitido alcanzar visiones y abordajes al sistema nervioso central cada vez mejores por vías menos invasivas (introducción del microscopio quirúrgico, la endoscopia, el ecógrafo, la estereotaxia o la neuroestimulación).

La historia de la Neuroanatomía y sus avances no podría entenderse sin los métodos de enseñanza y transmisión del saber que han permitido que los conocimientos adquiridos se compartan entre individuos de la misma época y generaciones siguientes.

La educación en Neuroanatomía a lo largo de la historia se ha visto influida por múltiples factores: sociales, religiosos, económicos, políticos y por supuesto tecnológicos. Los estudiantes cambian, los profesores dedicados a su enseñanza varían y el tiempo dedicado a su conocimiento no es el mismo que en antaño.

Los **objetivos** principales de la educación en Neuroanatomía se pueden resumir en tres:

- Inculcar un conocimiento básico sobre el funcionamiento y estructura del sistema nervioso a cualquier futuro profesional del ámbito sanitario.

- Equipar de un conocimiento más profundo a médicos cuya especialidad esta directamente relacionada con la patología del sistema nervioso central (neurólogos y neurocirujanos) .
- Estimular entre los alumnos el impulso investigador como dedicación exclusiva o combinada con la práctica clínica¹⁶.

Revisando la historia de la Neuroanatomía se pueden definir varios **métodos** de educación:

- *La disección de cadáver* . Ya sea realizada por el propio alumno individual o colectivamente o realizada por el profesor y atendida por los pupilos.
- *La plastinación*. Es un método de preservación de piezas anatómicas ya disecadas que permite su conservación a temperatura ambiente sin necesidad de mantenerse preservado en medios líquidos y por tanto su fácil transporte y manipulación por los alumnos.
- *La contemplación del modelo en vivo*. Se trataría de contemplar la anatomía humana de superficie en una persona viva que puede ser un paciente, un modelo o el propio alumno (aprendizaje en parejas). Este método es más aceptado en el estudio de la exploración neurológica que la anatomía del sistema nervioso.
- Presenciar *cirugías en directo*.
- La disección de *modelos animales* que guarden parecido con el sistema nervioso del humano.
- El uso de *modelos sintéticos*. Se incluyen prototipos para la simulación de cirugías.

- *Material bibliográfico*: basado principalmente en textos descriptivos, fotografías, dibujos y esquemas docentes (atlas, artículos, láminas,..)
- *Material radiológico clínico*: estudio a través de imágenes de tomografía computarizada, resonancia magnética, tractografía , ecografía,... y su reconstrucción digital.
- *Material audiovisual*: videos ilustrativos aplicaciones informáticas de reproducción de la anatomía en formato tridimensional y con carácter interactivo.

Y en función de la **interacción** del alumno con la enseñanza, ésta puede ser:

- *Pasiva* : clases anatómicas magistrales impartidas por el profesor (ya sean teóricas, de disección en cadáver o de demostración con modelo vivo)
- *Activa*: autoaprendizaje del alumno (con libro, cadáver, material audiovisual interactivo,..)
- *Aprendizaje por parejas* (exploración de la anatomía de superficie entre compañeros)

Cuando nos preguntamos sobre **la figura actual del profesor** en Neuroanatomía, la respuesta nos lleva a hablar de un perfil cada vez más heterogéneo. Es difícil actualmente encontrar la figura clásica del anatomista dedicado exclusivamente a la caracterización e investigación en la estructura del sistema nervioso. Por el contrario, nos encontramos con dos tipos de perfil:

- El profesor dedicado a ciencias básicas (el neurocientífico): que suele ser neurobiólogo, neurofisiólogo , neurogenético, neurofarmacólogo, etc..
- El profesor dedicado a ciencias clínicas (el clínico): sería neurocirujano, neurorradiólogo, neuropatólogo, neurólogo...

Hay que tener en cuenta que los estudiantes que se forman son futuros médicos u otros profesionales del ámbito de la sanidad. Es evidente que el enfoque clínico de la enseñanza anatómica no lo va a transmitir igual el primer perfil que el segundo. Sin embargo, también es cierto que los conocimientos sobre cómo y porqué funcionan los elementos del sistema nervioso en el ser humano es objeto diario de estudio por los profesores de ciencias básicas y probablemente transmitan al alumno una mayor inquietud por la investigación en la materia.

Aunque la figura de un neuroanatomista especializado sería la mas apropiada para impartir la materia, se puede considerar que el requisito más importante que debe cumplir el profesor es saber motivar al alumno y proporcionarle los métodos más efectivos de enseñanza que estén a su alcance¹⁷.

3.2 La disección anatómica en cadáver.

De todos los métodos de enseñanza e investigación en anatomía , probablemente el que más avances haya aportado ha sido la disección en cadáver.

A lo largo de la historia, la disección de cadáveres humanos para la educación médica ha experimentado varios ciclos de legalización y prohibición en diferentes culturas y países.

Hasta la edad Media la ley prohibía la disección y la autopsia del cuerpo humano, por lo que los médicos tenían que utilizar otros cadáveres. Galeno, por ejemplo, diseccionó monos y otros primates, asumiendo que su anatomía era básicamente la misma que la de los seres humanos. Existe una excepción durante este periodo que fue la civilización griega, que permitió que las primeras disecciones humanas fueron llevadas a cabo por médicos como Herófilo de Calcedonia y Erasistrato de Chios en el siglo III antes de Cristo ¹⁸.

No hay clara referencia a la práctica de la disección humana en el mundo árabe. Parece que la prohibición era la norma según se recoge en los escritos de al-Nafis experto en jurisprudencia islámica ¹⁹.

Hay datos acerca del precoz desarrollo de la anatomía en la medicina tibetana. Se relata que este desarrollo venia fomentado por prácticas rituales funerarias que incluían la práctica de la disección en los fallecidos. El Tíbet se convirtió en el hogar de los centros médicos budistas Chogppori y Menchikhang muy conocidos y arraigados entre el siglo XII y el siglo XVI²⁰.

La religión cristiana, a partir del siglo XIII da un giro en cuanto a que deja de considerar el cadáver humano como algo sagrado. Las legislaciones en los países europeos comienzan a permitir las disecciones y las autopsias. De esta época data la primera disección pública por parte de Mondino de Liuzzi. Mas tarde, y ya en el siglo XVI, Andrea Vesalio practica disecciones de forma sistemática con las que ilustra su celebérrima obra anatómica²¹.

A principios del siglo XIX se produce en Reino Unido un cambio en el modelo de enseñanza de la anatomía. Se pasa de un modelo de enseñanza privada basado en el aprendizaje de un alumno privilegiado con un cadáver, a un modelo en el que los hospitales empiezan a gestionar los cadáveres de sus propios pacientes y dan acceso a ellos a

los estudiantes de medicina que están formando. Al mismo tiempo, la disponibilidad cada vez mayor de especímenes permite cambiar el modelo de enseñanza de un proceso pasivo en el que los alumnos presencian la disección del profesor (“anatomy theatre” propio del Renacimiento) a un proceso activo en el que el alumno lleva a cabo la disección con sus propias manos. Este cambio, sin embargo, trajo consigo un problema de discriminación, en el cual a las mujeres no se les permitía realizar la disección del cadáver. Afortunadamente a lo largo del siglo XX el proceso de universalización de la educación ha contribuido a mejorar este problema.

Uno de los debates más controvertidos en lo que al estudio de la anatomía humana respecta trata de enfrentar la disección en cadáver con el estudio de la anatomía en vivo. Antes de nada conviene tener en cuenta qué consideramos estudiar la anatomía en vivo. Cuando nos referimos a visualizar el aspecto externo de un cuerpo humano, en la práctica de la neuroanatomía no encontramos apenas utilidad. Sin embargo si hablamos de visualizar el sistema nervioso de un individuo vivo, debemos referirnos obligatoriamente a la visualización de este por dos métodos: la cirugía o las pruebas de imagen radiológicas en pacientes.

Por supuesto que el aprendizaje más efectivo de cualquier materia o profesión es desarrollarlo en primera persona. Sin embargo, en el caso de la neuroanatomía, el estudiante de medicina lógicamente no puede manipular ni visualizar directamente el sistema nervioso vivo entre sus manos. Es por ello que el cadáver siga siendo una herramienta fundamental en la enseñanza de este campo de la neuroanatomía ya que, con el avance de las técnicas de preservación e inyección de

colorantes en cadáver, se consigue un aspecto muy similar al que presenta en condiciones normales de vida.

La amplia mayoría de artículos y libros que hablan de educación en anatomía ²²⁻²⁵ defienden la disección y coinciden en tres **beneficios** fundamentales de su uso:

- El más fundamental es la apreciación directa tridimensional de la relación entre *estructuras anatómicas integradas* unas con otras en la condiciones reales.
- Por otro lado la capacidad de tocar y disecar el cadáver permite adquirir *habilidades manuales* que son útiles en la práctica quirúrgica.
- Beneficios indirectos relacionados con la *actitud* del alumno respecto a la anatomía. El respeto al paciente, el trabajo en equipo, la profesionalidad, etc..

Sin embargo, hay que señalar que la disección en cadáver tiene también sus **inconvenientes**:

- *Emocionalmente* resulta a veces complicado para el alumno enfrentarse a un cadáver con todas sus connotaciones: el aspecto del espécimen, su olor, las creencias culturales o religiosas del alumno respecto a la muerte²⁶. Algunos estudios hablan de hasta un 5% de alumnos de medicina que durante las primeras semanas de aprendizaje frente al cadáver sienten graves problemas psíquicos tales como insomnio, pesadillas, depresión, déficits severos de atención y aprendizaje.^{27,28}
- La manipulación y el contacto con cadáveres tiene unos *riesgos de salud* asociados: riesgo de transmisión de enfermedades infecciosas (VIH, tuberculosis, hepatitis,

encefalopatía espongiiforme,...) o daños causados por contacto con medios químicos de preservación²⁹.

- *Problemas logísticos* relacionados con: la dificultad para adquirir donantes; el coste de su transporte, mantenimiento y el manejo de residuos; el coste de personal docente y técnicos para el aprendizaje basado en cadáveres. Además se une la falta de accesibilidad del alumno al cadáver. Por otro lado, requiere mucho tiempo diseccionar una estructura concreta.

Estos inconvenientes han llevado a complementar (que no sustituir) la disección del cadáver con otros métodos de enseñanza de la anatomía.

3.3 Nuevos métodos de enseñanza anatómica basados en la tecnología.

La anatomía es una ciencia milenaria. Con el paso de los siglos las herramientas para el estudio de la anatomía han cambiado progresivamente. Desde la disección anatómica manual, pasando por los textos y dibujos escritos, hemos llegado a la revolución actual basada principalmente en la tecnología informática.

Debido a los problemas ya comentados que limitan el uso de cadáveres en la enseñanza de la anatomía, se han impulsado nuevos métodos educativos virtuales.

Se está desarrollando en la actualidad un nuevo perfil de anatomista que domina el lenguaje informático para poder crear modelos virtuales³⁰. Cuando se crean aplicaciones informáticas relacionadas con anatomía se tiende a reproducir únicamente una estructura estática en el espacio con fines meramente descriptivos. Sin embargo, la anatomía actual pretende unificar las distintas subdisciplinas que se

han ido desarrollando en los últimos años: la biología molecular, la fisiología, la neurobiología...

Podemos distinguir diferentes métodos o áreas de interés cuando nos referimos a los **avances informáticos** asociados a la anatomía:

- *Imagen*

La imagen es la base de la educación en anatomía. A lo largo de siglos se ha pasado de la imagen basada en dibujos a mano y grabados a la imagen digitalizada. En medio de este proceso cabe destacar la aparición de la cámara fotográfica que supuso la posibilidad de capturar imágenes reales tomadas al cuerpo humano habitualmente en el cadáver. El procesamiento digital de la imagen ha permitido además tratar las imágenes reales tomadas en vivo a través de diferentes pruebas de imagen como la TC (tomografía computarizada), la RM (resonancia magnética) el PET (tomografía por emisión de positrones) o la ultrasonografía. Este tratamiento de imágenes convierte imágenes clásicamente estáticas bidimensionales en reconstrucciones tridimensionales que pueden ser rotadas y exploradas por nosotros interna y externamente. Incluso se ha conseguido añadir aspectos dinámicos fisiológicos a esas imágenes.

- *Bases de datos*

Aunque clásicamente el anatomista ha tenido una meticulosa función organizativa de la colección de imágenes anatómicas, no cabe duda que el ordenador ha sido crucial para ayudar en el manejo y ordenamiento de las imágenes anatómicas a través de bases de datos informáticos.

El más conocido sistema informático para organizar dichas bases es el conocido como SQL (structured query language). Una de las primeras y más importantes bases de datos sobre el cuerpo humano existentes

es el Visible Human data set ³¹ creado en la Universidad de Colorado y que cuenta con una colección de más de 5000 cortes axiales de un cadáver humano seccionado en cortes de unos 0,33 mm. Cada corte era fotografiado y el conjunto de fotografías quedaban almacenadas en una base de datos. Muchos otros centros, principalmente universidades americanas compitieron por tener bases de datos propias con sus propios cadáveres.

- *Procesado de imágenes y visualización*

Las funciones más importantes del procesado de imágenes son el realce, la segmentación, la cuantificación, el registro, la visualización, la compresión, el almacenamiento y la comunicación ³².

En otras palabras, partiendo de las imágenes planas coleccionadas en las bases de datos, la aplicación informática procesaría los componentes de cada fotografía de forma que se podrían formar imágenes 3D de cada componente del cuerpo humano. Todo ello se basaría en la aplicación del lenguaje de programación adecuado para procesar las imágenes. Esto nos permitiría por ejemplo obtener en una pantalla una imagen volumétrica de un pulmón con todas sus dimensiones y capacidad para moverlo y visualizarlo en pantalla en todas direcciones. Uno de los primeros y más conocidos sistemas de procesado de imágenes en 3D fue el "Surfdriver" para PC, desarrollado por Scott Lozanoff y usado para el manejo de la Visible Human database. Esta reconstrucción de imágenes se puede aplicar tanto a bases de datos de cortes seccionales en cadáver como también se aplica diariamente a los cortes obtenidos por pruebas de imagen radiológicas (TC, RM, PET..). Una herramienta de gran utilidad para desarrollar esto a nivel usuario es el sistema Osirix de MacOS³³. Estas aplicaciones procesan las imágenes siguiendo un formato universal de

codificación de imágenes médicas conocido DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine). Este es el estándar reconocido mundialmente para el intercambio de pruebas médicas, pensado para su manejo, visualización, almacenamiento, impresión y transmisión.

- *Realidad virtual*

Como hemos señalado con anterioridad el presente y futuro de la enseñanza en anatomía y casi en cualquier campo de la educación es crear entornos virtuales que simulen la realidad mediante el procesamiento de imágenes.

En este principio se basa la realidad virtual. Se puede definir como un sistema de computación usado para crear un mundo artificial en el cual el usuario tiene la impresión de estar y la habilidad de navegar y manipular objetos en él. Se pueden definir dos tipos de realidad virtual: inmersiva y parcial. La **inmersiva** que permite al usuario sumergirse completamente en el mundo artificial que se ha creado a través de dispositivos sensoriales e interactuar con los objetos de dicho mundo. Se podría usar , por ejemplo, un casco con visor y unos guantes con sensores. Este tipo de acercamiento virtual a la realidad tiene especial aplicación en el aprendizaje quirúrgico. Se han creado simuladores que permiten a los cirujanos experimentar las sensaciones reales de una cirugía con sus propias manos.

Por otro lado están los sistemas de realidad virtual **no inmersivos parciales** que se basan en la reproducción de elementos anatómicos (por ejemplo un cráneo) en 3D con capacidad para manipularlo como queramos en el espacio. Podemos girarlo, aumentarlo, darle la vuelta, usando aplicaciones informáticas que funcionan en ordenadores convencionales³⁴.

El formato estandarizado para el manejo de los objetos reproducidos en realidad virtual se denomina VRML (Virtual Reality Modeling Language). Es un formato de archivo normalizado que tiene como objetivo la representación de escenas u objetos interactivos tridimensionales; diseñado para su empleo en la web. Este lenguaje permite la descripción de objetos 3D multimedia a los cuales se puede asociar un enlace de manera que el usuario pueda acceder por internet a una web con imágenes o videos. Este formato fue publicado por primera vez en 1995.

Existen cada vez más investigaciones encaminadas a crear una mezcla entre realidad virtual basada en creaciones informáticas y la auténtica realidad. Para ello se han creado en neurocirugía una gafas transparentes que permiten al cirujano ver un modelo 3d de tumor basado en RM mientras mira la piel o el cráneo de un paciente al que está operando.

Cuando hablamos de reconstrucción digital de un elemento en 3D, nos referimos a que dicho objeto va a estar codificado con sus tres dimensiones, alto, ancho y profundo de modo que vamos a poder moverlo en la pantalla de nuestro ordenador como si de un volumen se tratara. Uno de los proyectos más importantes llevados a cabo en la divulgación de la anatomía digital en 3D el programa EVA (Educational Virtual Anatomy) que proporciona una base de datos web en la que se comparten una serie de películas que permiten la visualización interactiva de diferentes partes del cuerpo humano reconstruidas digitalmente en 3D. Se utiliza en estos casos como fuente de imágenes cortes de TC o RM en formato DICOM y obtenidos de pacientes o voluntarios sanos. Las imágenes son procesadas después en la plataforma Osirix de MacOS. Para aislar estructuras anatómicas y separarlas del resto del cuerpo se lleva a cabo una selección de

densidades que permite acotar éstas de forma que manualmente podamos hacer aparecer o desaparecer la estructura que nos interese (piel, músculo, hueso, vasos,..). Es lo que se conoce como “inyección virtual de contraste”³⁵. Una vez tratadas y convertidas en estructuras tridimensionales digitalmente, las múltiples imágenes que componen el volumen son grabadas como una película con el QTVR (Quick Time Virtual Reality) que crea una matriz de secuencias de una estructura determinada que permite al usuario moverlas virtualmente en el espacio³⁶.

Como ya veremos más adelante, estos modelos computarizados son percibidos por nosotros como tridimensionales gracias a que transmiten una serie de efectos visuales que nos hacen ver de forma simulada su profundidad (sombras, perspectiva lineal, tamaños relativos, etc). Sin embargo, estos objetos se están proyectando a nuestros ojos a través de una pantalla convencional como una simple imagen plana en 2D. La verdadera y más fisiológica percepción tridimensional de los objetos es la que se adquiere de forma binocular o estereoscópica que es la visión con la que percibimos los objetos reales de nuestro entorno. El futuro de la realidad virtual pasa por que los entornos y objetos que se visualizan en él sean percibidos por el usuario en modo estereoscópico.³⁷⁻³⁹

En este sentido se han puesto en marcha algunas plataformas que divulgan la anatomía de forma virtual en formato 3D estereoscópico.

Así, el grupo de Brown PM y col. de la Universidad de Aberdeen en Reino Unido fueron pioneros en 2012 creando un software de este tipo. A partir de reconstrucciones volumétricas 3D basadas en imágenes de TC y RM en formato DICOM, fueron capaces de reproducirlas de forma estereoscópica con proyectores y pantallas específicas. La novedad del proyecto estaba en que los alumnos iban a percibir los modelos

anatómicos reconstruidos con la sensación de realidad que ofrece la visión binocular.⁴⁰

El uso de estas plataforma virtuales basadas en pruebas radiológicas **tienen la ventaja de mostrar la anatomía basada en un cuerpo humano vivo**. Además al tener como origen imágenes radiológicas, permiten al estudiante familiarizarse con la imagen del cuerpo humano que van a tener más comúnmente delante suyo en la práctica clínica (al menos fuera de un quirófano).

Otra de las indudables ventajas del uso de plataformas virtuales es la **alta accesibilidad y disponibilidad** que tiene. Puede ser consultado en cualquier momento y lugar sin requerir la logística y el reducido tiempo al que obliga el uso del cadáver.

A pesar de las enormes ventajas que la realidad virtual nos aporta en la docencia y visualización de la anatomía, no sería apropiado sustituir de forma definitiva el uso del cadáver en la enseñanza. La mayor parte de autores coinciden en que ambas aproximaciones deben ser complementarias²⁷.

La presente tesis describe una forma de enseñar la neuroanatomía que uniría ambos métodos de enseñanza. Mostramos fotografías y videos de piezas anatómicas disecadas o abordajes quirúrgicos utilizando la visión estereoscópica 3D para que la aproximación del alumno al cuerpo humano sea lo más real posible. De este modo, se proporciona a los alumnos en diferentes formatos (papel, ordenador o proyección en aula) la imagen del cadáver o del campo quirúrgico simulando la visión binocular. Es decir, la visión más real que tendría en una sala de disección frente al cadáver o sentado frente a un paciente en un quirófano.

Uno de los trabajos más completos que muestran la aplicación de la estereoscopia en la imagen y video tomados de disecciones de cadáver,

cirugía en vivo o modelos virtuales fue el publicado en 2002 por Henn JS y col. que crean lo que se conoce como ISVR (interactive stereoscopic virtual reality). Utiliza el formato QTVR para montar videos con los que interactuar. Se toman fotografías de una región anatómica (pieza de cadáver disecada, cirugía en vivo,..) con un microscopio. Cada captura tomada se compone de dos fotografías que van a corresponder a cada ocular del microscopio. De esta forma se están tomando fotos estereoscópicas en 3D. Al hacer las capturas desde diferentes ángulos de visión se consigue que el montaje final e todas ellas sea un video en QTVR que puede ser manipulado libremente por el usuario en su pantalla de ordenador. El elemento anatómico fotografiado podrá ser visualizado por el usuario con efecto 3D y tendrá el efecto de moverse en el espacio⁴¹.

Aunque el método descrito de captura de imagen 3d es parezca fácil, el uso de dispositivos y cámaras que graven imágenes de forma directa de un microscopio no está estandarizado y puede resultar costoso. Es por ello que en nuestra descripción del material y método de trabajo proponemos una forma mucho más accesible de capturar imágenes estereoscópicas.

3.4 Principios básicos de la visión estereoscópica

La estereoscopia es la técnica que permite captar información visual de forma tridimensional, es decir con ilusión de profundidad. Dicha sensación se crea presentando una imagen ligeramente diferente a cada ojo. Esto es lo que ocurre de forma fisiológica cuando observamos la realidad con nuestros dos ojos.

Dado que los ojos se encuentran separados uno de otro, cada uno de ellos recoge en su retina una imagen ligeramente diferente una de otra

y, a su vez, diferente a la realidad que tiene delante. Nuestro cerebro procesa las diferencias entre ambas imágenes y las interpreta integradas de forma que percibimos la sensación de profundidad, lejanía o cercanía de los objetos que nos rodean. Es como si el cerebro calculara de forma automática la distancia entre los objetos en función de las diferencias percibidas entre ambas imágenes. Este proceso se denomina *estereopsis*. Para crear la ilusión tridimensional es necesario que las imágenes sean tomadas con un desplazamiento horizontal una de otra y no vertical.

Si bien la estereoscopia es la principal fuente de información del cerebro para la composición tridimensional de los objetos que estamos viendo, no es la única. Existen otras fuentes de información que también son utilizadas en el proceso de visualización del entorno (Fig 1).

Mecanismos de visión tridimensional:

- *Iluminación del objeto.*(Fig 1a)

La percepción de luces y sombras hace que nuestro cerebro perciba una sensación de relieve en los objetos. Esta es una de las técnicas más conocidas que utilizamos en pintura o cualquier expresión de la realidad en 2d para simular profundidad de los objetos.

- *Paralelaje por movimiento.* (Fig 1b)

Cuando nos movemos, los objetos situados delante nuestro aunque estén estáticos son percibidos en movimiento. De esta forma, los objetos más alejados parecen moverse en el mismo sentido que nuestro nosotros mientras que los cercanos se mueven en sentido opuesto.

- *Variación del tamaño en movimiento.* (Fig 1c)

Cuando nos acercamos a un objeto este varía de tamaño ante nuestros ojos. Dicha variación de tamaño nos dará información de la distancia a la que se encuentra.

- *Superposición de imágenes.* (Fig 1d)

Cuando visualizamos dos objetos y uno de ellos aparece ocultando al otro nuestro cerebro tiende a interpretar que el objeto que oculta esta por delante del objeto oculto.

- *Perspectiva.* (Fig 1e)

Es el efecto por el cual las líneas paralelas se acercan entre sí al alejarse. Esta disposición de las líneas nos genera automáticamente una idea de la distancia a la que se encontrarían los objetos situados a ambos lados de la líneas. Por ejemplo: las farolas situadas a ambos lados de una carretera se percibirán más lejanas al situarse al nivel de mayor convergencia entre los bordes de la carretera.

- *Tamaño aprendido de las cosas.* (Fig 1f)

Esta es la propiedad por la cual podemos intuir las distancia entre varios objetos conocidos en función del tamaño con el que los percibamos. Es decir, si se nos representa en una imagen un árbol y una montaña y ambos con el mismo tamaño, nuestro cerebro percibirá el árbol más cercano que la montaña.

La estereopsia sería la verdadera y fisiológica capacidad de ver en tres dimensiones gracias a la visión binocular.

Esta capacidad se debe a la distancia entre los dos ojos que está entre 45 y 75 mm (con una media de 65mm). El lo que conocemos como distancia intraocular.

Cuando miramos un objeto se generan dos ejes ópticos, uno para cada ojo. Para una correcta visualización del objeto se deben producir dos fenómenos: la convergencia y la acomodación. La *convergencia* es la intersección de los ejes ópticos en un punto. La *acomodación* es el enfoque óptico de un punto. La **fusión** sería la suma de ambos fenómenos. La imagen estéreo sería resultado de la fusión obtenida por ambos ojos.

El **paralelaje** es el ángulo formado por la dirección de dos líneas visuales relativas a la observación de un mismo objeto desde dos puntos distintos, suficientemente alejados entre sí y no alineados con él. Este ángulo es el responsable de que percibamos la profundidad de los objetos y va a depender fundamentalmente de dos factores (Fig 2):

- La *distancia interocular* (DIO) a mayor distancia mayor será el ángulo de paralelaje.
- La *distancia al objeto*(d) visualizado: a mayor distancia menor ángulo entre los ejes ópticos y por tanto menor paralelaje.

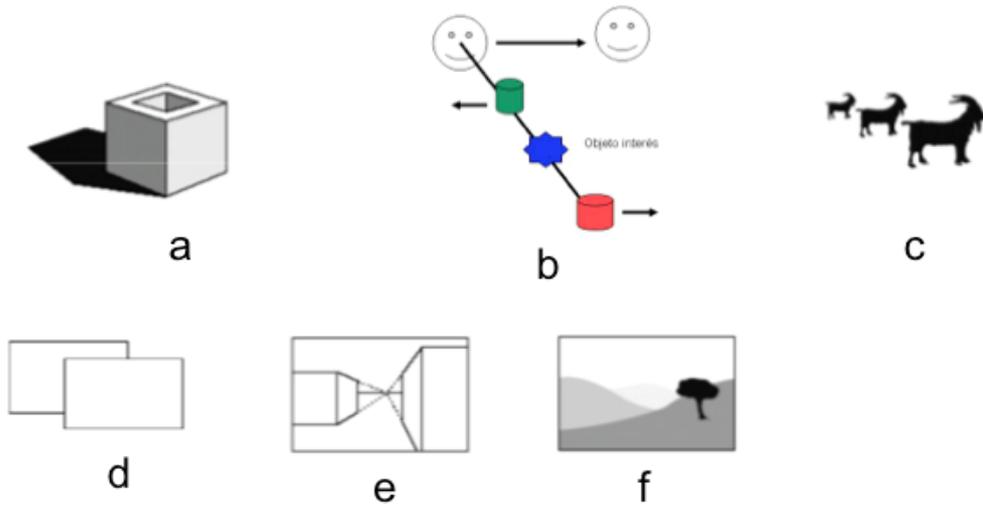


FIG 1. Mecanismos no estereoscópicos de visión tridimensional. a) *Iluminación del objeto*; b) *Paralelaje por movimiento*; c) *Variación del tamaño en movimiento*; d) *Superposición de imágenes*; e) *Perspectiva*; f) *Tamaño aprendido de las cosas*.
(Figura modificada de la original obtenida de <http://es.slideshare.net/juaxix1/estereoscopia>)

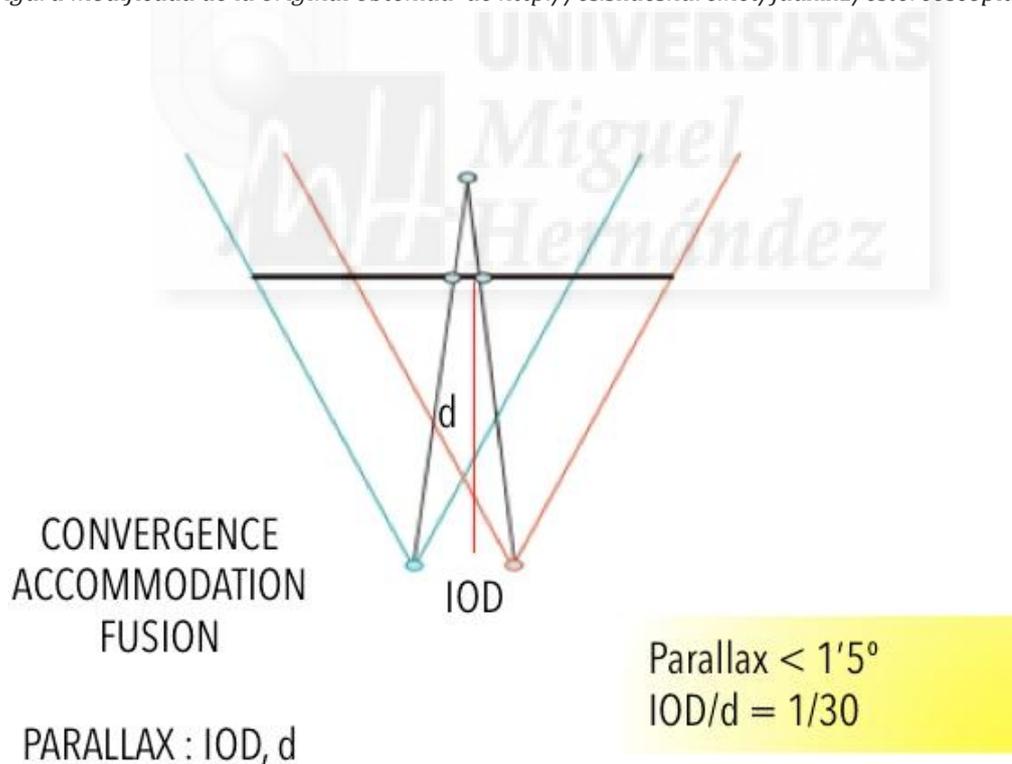


FIG 2. Paralelaje en la estereoscopia.
d.- distancia al objeto; DIO.- distancia interocular.

Cuanto mayor sea el paralelaje mayor será la sensación de profundidad percibida por nuestros ojos. Sin embargo no es recomendable exceder un límite que suele ser calculado en torno a un ángulo de 1,5 grados.

Como más adelante veremos en Material y métodos, en esta tesis pretendemos simular la visión fisiológica en 3d de nuestros ojos mediante la adquisición de fotografías o videos con cámaras. Para ello hemos de tener muy presente este principio de relación entre la distancia intraocular y la distancia al objeto que va a ser fundamental a la hora de adquirir las fotografías estereoscópicas. Aunque las distancias de adquisición de imágenes pueden ser variables se puede establecer una relación entre la distancia interocular (DIO) y la distancia al objeto (d). Para poder obtener una óptima sensación de profundidad la relación sería de $DIO/d=1/30$. De esta forma, si la distancia intraocular media es de 6,5 cm la distancia a la que percibimos de forma óptima (en parámetros de convergencia y acomodación) la profundidad de un objeto sería de unos 195 cm.

Por tanto, si queremos fotografiar un objeto (en nuestro caso una pieza anatómica) que situamos a unos 60 cm de nuestra cámara de fotos la distancia a la que debemos desplazar lateralmente la cámara de fotos para adquirir un buen efecto 3D sería de 2 cm. Si bien, como ya hemos explicado, a mayor desplazamiento lateral de la cámara mayor efecto de profundidad⁴².

Existen varios elementos que deben cumplirse para que la visión estereoscópica sea correcta:

1. *Ángulo de paralelaje.*

Este ángulo determinará la relación entre la convergencia de los ejes ópticos y la acomodación o enfoque en un

punto. Es importante que el ángulo de paralelaje no sea excesivo de modo que el punto de convergencia sea lo más cercano posible al punto de acomodación para que de esta forma la fusión de imágenes de ambos ojos se produzca de forma adecuada. De lo contrario se producirá incomodidad en la percepción.

2. Paralelaje horizontal/ vertical

Realmente el único paralelaje que se debe percibir en la estereoscopia es el horizontal. En la visión binocular, las imágenes captadas de un objeto se perciben por dos ojos que se encuentran a la misma altura (aproximadamente) en el plano horizontal, percibiéndose una leve diferencia o desplazamiento de la imagen en este eje. Sin embargo, cuando el desplazamiento o diferencia entre las imágenes captadas se produce en el eje vertical, no se genera percepción de profundidad sino incomodidad. Como veremos en Material y Métodos, uno de los errores más frecuentes que provocan defectos en la adquisición de fotos estereoscópicas se produce cuando existe un desplazamiento vertical en la posición de la cámara entre cada captura.

3. Imágenes congruentes.

Las dos imágenes que forman la visión estereoscópica han de ser similares en cuanto a luz, contraste, brillo y por supuesto deben mostrar la misma escena.

4. Imágenes cruzadas.

Los dos ojos deben percibir las imágenes del par estereoscópico al mismo tiempo.

5. Periferia de la imagen

Como decíamos antes con la congruencia, las imágenes que perciba cada ojo deben ser lo más parecidas posibles. Uno de los principales problemas que encontramos cuando capturamos con cámara dos imágenes paralelas de un mismo objeto está en la diferencia que suele mostrar la imagen en su periferia.

Todos estos conceptos se ejemplifican de forma óptima durante la presentación correspondiente a la defensa de la tesis en la que usamos el formato de proyección 3d polarizado.

La visión fisiológica binocular suele optimizar de forma automática todos estos factores de forma que la visión es percibida sin distorsión. Sin embargo, cuando hemos de construir de forma artificial la visión estereoscópica con cámaras fotográficas u otros instrumentos ópticos de captura se suele incurrir de forma habitual en estos defectos.

En el apartado de Material y Métodos desarrollamos la forma de adquirir las imágenes estereoscópicas teniendo en cuenta los factores antes citados.

Existen diferentes **técnicas de visualización estereoscópica**. Como veremos se tratan de diferentes modos de visualizar los pares de imágenes estereoscópicas adquiridas previamente. Todos convergen en el mismo objetivo, llevar a cada ojo su imagen correspondiente excluyendo la otra imagen.

1. Imágenes cruzadas:

Consiste en situar dos imágenes estereoscópicas una al lado de la otra. A la izquierda se sitúa la imagen que debe percibir el ojo derecho mientras que a la derecha se situa

la que percibe el ojo izquierdo. El espectador debe cruzar los ojos hasta percibir una única imagen en el centro de su campo de visión. La ventaja de esta técnica es que no requiere hardware y se mantiene el color original de las fotos. Sin embargo, para conseguir una correcta visualización se requiere entrenamiento y el esfuerzo de acomodación es muy molesto para la vista.

2. *Imágenes paralelas:*

Es el mismo principio que la anterior. En este caso las imágenes situadas a cada lado se corresponden con la situación de nuestros ojos: la imagen derecha va al ojo derecho y la izquierda al ojo izquierdo. Tiene las mismas ventajas y desventajas que la técnica anterior.

3. *Anaglifo.*

En este método, se realiza un filtro de color a las imágenes estereoscópicas. Este método juega con el fenómeno por el cual usando gafas en las que cada ocular tiene un filtro de color determinado se consigue hacer que cada ojo perciba una de las fotografías tomadas y no la otra en función del color que predomine en ella.

Aunque existen muchas combinaciones diferentes de gafas, las más estandarizadas probablemente sean las rojo-azul (es decir, ocular izquierdo en rojo y derecho en azul). (Fig 3) Esta técnica se base en el principio por el cual cuando usamos en un ocular de la gafa un filtro de un color no dejaría ver ese mismo color en las fotografías. Sin embargo dejaría ver sus colores complementarios. De esta forma, un filtro rojo no dejaría ver los colores rojos de una foto pero sí los complementarios azul y verde. Y al revés, un filtro

azul, no dejaría ver los colores azules ni verdes pero si los rojos. De este modo, las imágenes estereoscópicas son adquiridas o tratadas de forma que en ellas predomine el color complementario al filtro por el que van a pasar. Por ejemplo la imagen que pasará por el ocular rojo no tendrá dicho color sino que mostrará el azul y el verde predominantemente. Al contrario se hará con la otra imagen. Ambas fotografías se combinarán fusionadas en una misma imagen con un mínimo desplazamiento de una a otra. Este procesado previo de las imágenes y la fusión en una sola se puede realizar de forma automática con software especializado. (ver más adelante en Material y métodos). Esta técnica presenta como principal ventaja el hecho de que permite enseñar las imágenes en cualquier formato: papel, cualquier pantalla de ordenador, cualquier sistema de proyección convencional sin necesidad de usar filtros. Como inconveniente principal está el hecho de que crea cierta incongruencia en las imágenes captadas por cada ojo en lo referido al color. Esto afecta a la calidad de la imagen percibida que mostrará alterado su color y su luminosidad. A su vez, como ya dijimos, la disparidad de aspecto entre las imágenes provoca incomodidad y cansancio en la visualización prolongada. (Fig4). Este método es usado en la edición impresa de la presente tesis para mostrar las imágenes en 3d con el uso de gafas rojo-azul.

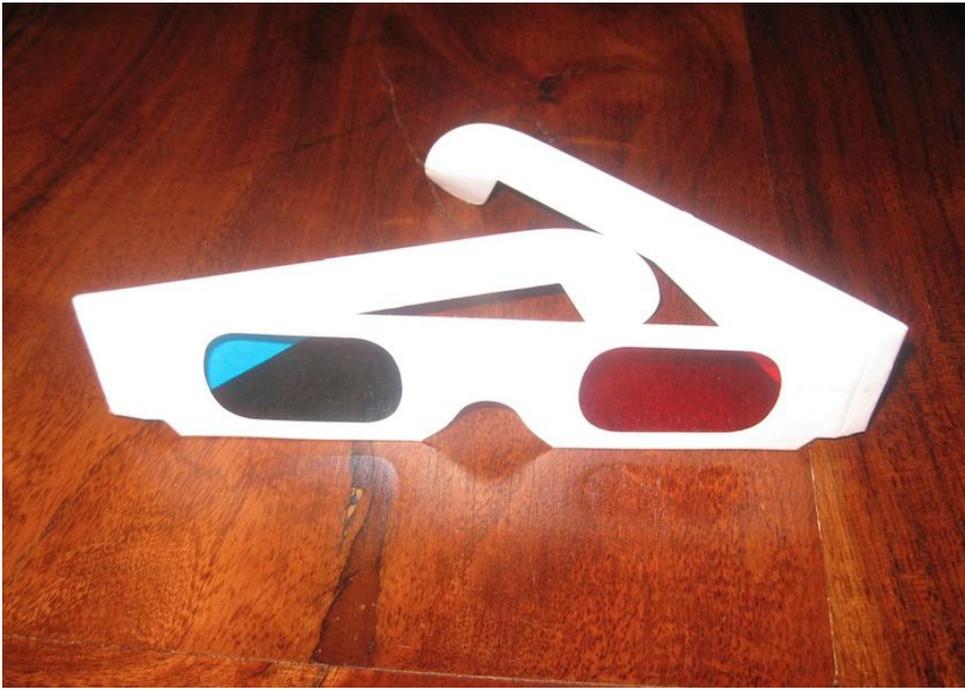


FIG 3. Gafas anaglifo.

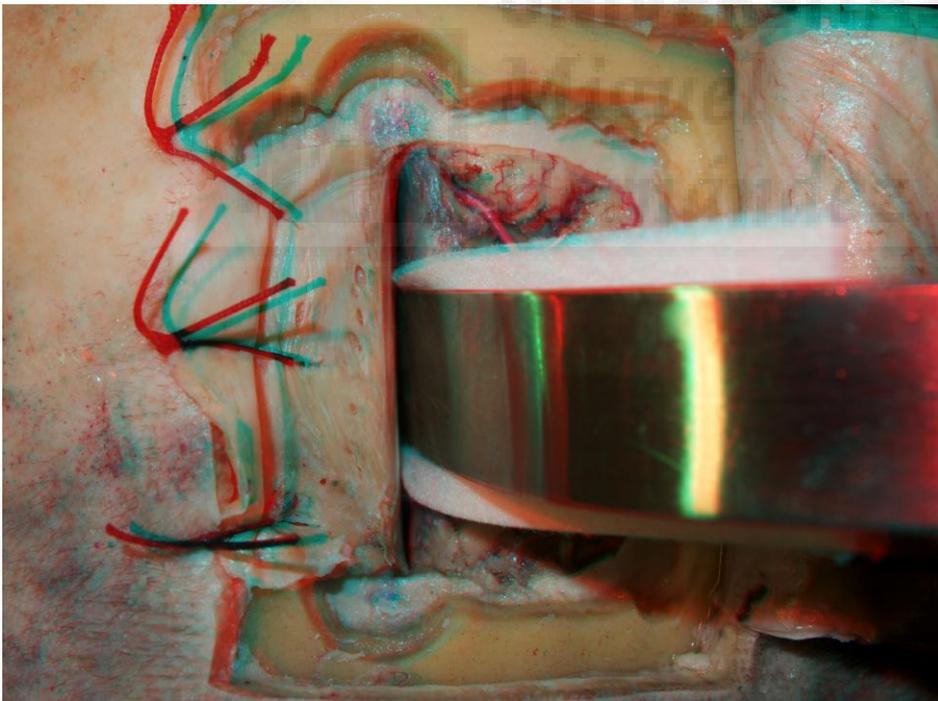


FIG 4. Ejemplo de fotografía anatómica procesada en formato anaglifo.

4. *Sistema Cromatek.*

Se basa en el uso de una rejilla de difracción. De forma similar a un prisma, la luz que la atraviesa se descompone en diferentes colores. Cada color experimenta un cambio de ángulo que al llegar al ojo humano es percibido como si cada color tuviera una profundidad diferente. Para conseguir el efecto es necesario que las imágenes que se proyecten tengan colores muy intensos.

5. *Polarización.*

Probablemente sea el sistema más utilizado en la actualidad. A diferencia del anáglifo no se modifica el color de cada imagen sino que se proyectan con diferentes grados de polarización. Para conseguir esto es necesario que la fuente emisora de cada imagen polarice la luz de forma diferente de forma que al llegar al espectador sus gafas hagan que cada ojo perciba una u otra imagen.

La proyección polarizada puede realizarse mediante monitores o proyectores especiales que proyecten de forma alternativa las dos imágenes polarizadas. Sin embargo, el método más clásico utiliza dos proyectores convencionales delante de los cuales se acoplan filtros con diferente capacidad polarizadora para cada uno de ellos. La proyección se realiza en pantallas especiales que contienen plata o aluminio para mantener la polarización de la luz que les llega. Finalmente se utilizan gafas cuyos oculares son también filtros preparados para dejar pasar la luz según su polarización a cada ojo.

Este método tiene como ventaja que permite la visualización 3d sin alteración de colores. Como inconveniente disminuye la luminosidad de las imágenes y precisa de dispositivos especiales de proyección no pudiendo visualizarse en papel ni con un proyector o pantalla convencional. (Fig5). Este método será utilizado en la defensa de la tesis doctoral.

6. *Proyección activa.*

En este sistema, el proyector o monitor emite de forma alternativa las imágenes estereoscópicas de cada ojo a gran velocidad. Para que cada ojo pueda ver su imagen cuando le corresponda, las gafas (“Active shutter glasses”) están sincronizadas con la proyección por infrarrojos para provocar el cierre o apertura de cada ocular mediante un sistema de cristal líquido o LCD. Este método es probablemente el más perfecto de todos en cuanto a calidad de visualización . Sin embargo, es en general más caro que otros métodos. Para una proyección dirigida a un publico numeroso el coste de las gafas es excesivo.

7. *Barrera de paralelaje.*

Se trata de un método utilizado en algunos monitores por el cual éstos proyectan de forma simultánea las dos imágenes estereoscópicas en forma de barras verticales dispuestas de forma alternativa. Delante de dicha emisión se coloca un filtro que hace que el ojo izquierdo solo vea las barras que forman la imagen izquierda mientras el ojo derecho verá las barras de imagen que reconstruyen la imagen derecha. La ventaja de este método es que no necesita gafas. Sin embargo, requiere que el espectador se

sitúe en una posición concreta perfectamente perpendicular a la pantalla y a una distancia limitada ⁴³.

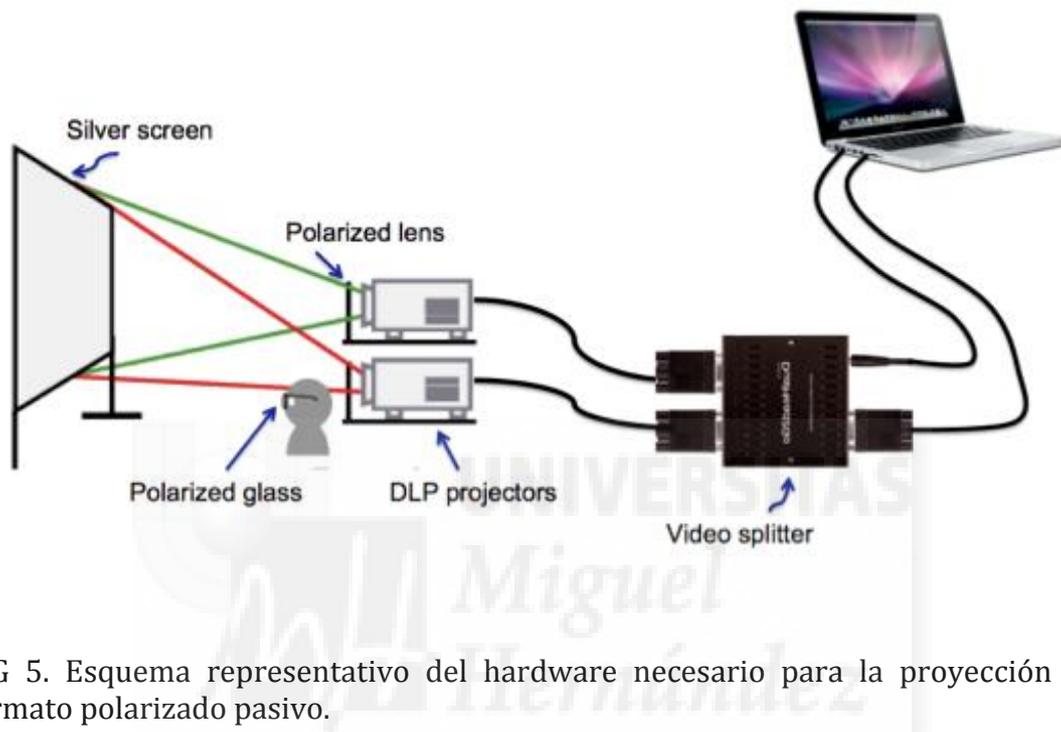


FIG 5. Esquema representativo del hardware necesario para la proyección en formato polarizado pasivo.

3.5 Historia de la visión estereoscópica y su aplicación en la docencia de la neuroanatomía.

Aunque la primera definición oficial de la estereoscopia data del siglo XIX la visión binocular ha sido estudiada con anterioridad por otros autores. Así, Euclides (300 A. C.) habla en sus teoremas de óptica sobre la visión binocular de la esfera.

Ya en el siglo II D.C Ptolomeo y Galeno vuelven a investigar sobre el tema. De hecho Galeno es el primero en describir las diferentes perspectivas visuales que tienen los dos ojos en su tratado sobre el “uso de las partes del cuerpo”. Considera que ambos ojos ven imágenes distintas y que, sin embargo, nuestra mente las fusiona como una sola.

Ha habido otros autores como Kepler y Descartes en el siglo XVII que asociaron la binocularidad con la sensación de profundidad. Además de la ciencia, el arte ha sido un reflejo de la evolución en el conocimiento de la visión estereoscópica o de profundidad. Hasta el siglo XV los pintores representaban sus obras como imágenes planas. Sin embargo, el Renacimiento y el impulso del realismo en la pintura sirven de base para sentar los principios de la recreación de la realidad con su perspectiva. Es Leonardo da Vinci el quien describe las reglas de la perspectiva rectilínea ⁴⁴.

La estereoscopia fue definida por primera vez en 1838 por Sir Charles Wheatstone quien describe los principios de la visión binocular en la Royal Society de Inglaterra. Fue un científico e inventor inglés que inventó el **primer aparato estereoscópico** que se conoce y que llevaba su nombre. Este aparato consistía en colocar dos espejos formando un ángulo de 45 grados con los ojos del espectador y que reflejaban cada uno una imagen que iría dirigida a cada ojo de forma

independiente. Cada ojo vería su imagen correspondiente sin ver la otra creando en el espectador la sensación de profundidad. El inconveniente del aparato eran sus grandes dimensiones que lo hacían poco manejable⁴⁵. (Fig6)

En 1839 Daguerre presenta el primer aparato fotográfico conocido como el “Daguerrotipo”, que permitía plasmar las primeras capturas fotográficas en una superficie de plata. Wheatstone trato de adaptar su estereoscopio al daguerrotipo sin éxito.

Pocos años después David Brewster inventa el llamado “estereoscopio lenticular” que sustituye los espejos por lentes y las coloca en una caja cerrada de menor tamaño que el dispositivo de Wheatstone. (Fig7) Este aparato fue presentado a la Royal Scottish Society en 1844. Uno de los principales factores que contribuyó al éxito del invento fue el entusiasmo de la reina Victoria de Inglaterra por la estereoscopia. Unos años después se consigue adaptar el daguerrotipo al aparato ideado por Brewster para capturar imágenes estereoscópicas. Este avance se atribuye a Jules Duboscq.

Las primeras fotografías estereoscópicas fueron tomadas con una sola cámara desplazando ésta horizontalmente unos 6cm (medida interpupilar).

En 1859 Oliver Wendell Holmes saca al mercado un estereoscopio sencillo en cuanto a su manufacturación y uso. Consistente en unas gafas prismáticas encuadradas en un marco de madera y unido a un porta fotos donde se colocan las imágenes estereoscópicas (Fig8).

Todo ello sujeto con una sola mano gracias a un mango que sujeta la estructura. Fue probablemente el estereoscopio más difundido y actualmente todavía hay empresas que lo fabrican. ⁴⁶⁻⁴⁹

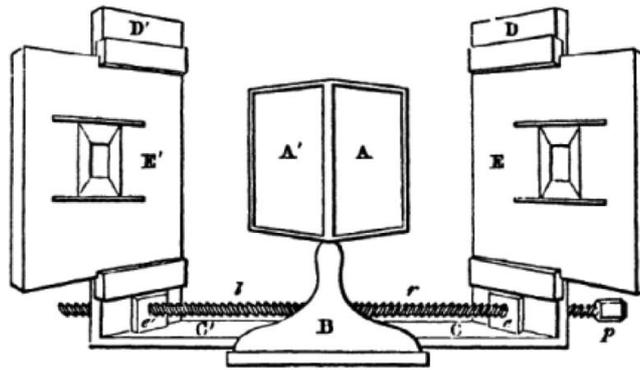


FIG 6. Estereoscopio de Wheatstone.
(Obtenida de <http://proyectoidis.org/estereoscopia/>)

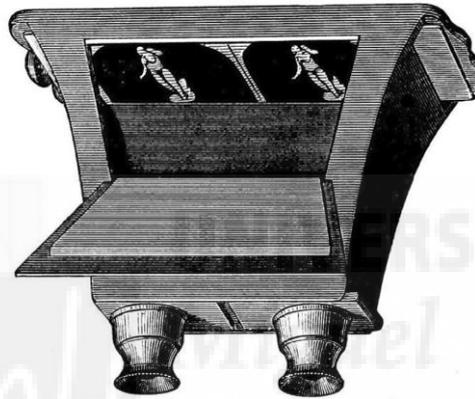


FIG 7. Estereoscopio de Brewster.
(Obtenida de https://en.wikipedia.org/wiki/Stereoscope#/media/File:PSM_V21_D055_The_brewster_stereoscope_1849.jpg y a su vez de Unknown - [Popular Science Monthly Volume 21](#) . Dominio público)



FIG 8. Estereoscopio de Holmes.
(Obtenida de https://en.wikipedia.org/wiki/Stereoscope#/media/File:Holmes_stereoscope.jpg . Autor Davepape. Dominio público)

Los franceses Joseph D'Almeida y Louis Du Hauron (inventor de la fotografía color) presentaron en 1858 las primeras proyecciones estereoscópicas por medio de filtros de colores azules y rojos. La definición para este proceso fue llamado **Anaglifo** (del griego anaglyphos: hecho en relieve). Este método de visualización 3D se ha mantenido vigente hasta la actualidad y probablemente sea el método más sencillo de visualizar 3d en el sentido de no precisar más que unas simples gafas sin necesidad de complejos sistemas de proyección.

Durante la segunda mitad del siglo XIX tiene lugar el nacimiento de la cinematografía. Esto hace que se empiece a pensar en la estereoscopia animada. En este sentido cabe destacar varios inventos de la época: el prototipo de Czermakal que llamó estereoforoscopio; Phillppe Benoist construyó un estereocopio "animado"; el Kinimoscopio de Adam Jundzill, el Fenakistoscopio de Fume y Tournier, y otros equipos más con nombres cada vez más extravagantes. La primera cámara de cine estereoscópica fue inventada por el fotógrafo inglés William Friese-Greene en 1890. Friese-Greene había inventado unos años antes la cámara "cronofotográfica" publicada en un artículo de la Revista Scientific American en Abril de ese mismo año. No tuvo demasiado éxito ya que la cámara, que tomaba 10 fotografías por segundo utilizando celuloide perforado, poseía muy mala calidad. Su cámara fue la primera en imprimir un par estéreo de imágenes en la misma película.

En esta época de inicio de la estereoscopia, la utilidad de la técnica como herramienta educacional no pasó inadvertida. Un ejemplo es la publicación en 1870 por Hurst de la obra "Hurst and Son Natural History Series of birds and mammals for use in schools" que contenían una gran galería de imágenes estereoscópicas de animales para su uso

docente. Porter T.C. en 1899 publica "Impressions of América" que recopila imágenes de una amplia variedad de campos del conocimiento.

Sin embargo, la primera empresa en sistematizar el uso del 3d en educación será Underwood & Keystone. Dicha compañía recopila miles de imágenes estereoscópicas relacionadas con diferentes materias (Agricultura, Geografía, Arte, Ciencias naturales, Industria, Arquitectura o Ciencias de las salud) . Además de recopilarlas las edita de forma que sirvan como experiencia docente organizada para los alumnos que las visualizan. Se considera que la estereoscopia constituye una herramienta docente fundamental ya que permite mostrar la realidad de forma que el alumno no tenga que moverse de su aula o su propia casa. La empresa en 1935 había acumulado hasta dos millones de negativos de fotografías estereoscópicas⁵⁰. Sin embargo, a partir la segunda década del siglo XX la estereoscopia cae en desuso de nuevo con la llegada de otros medios de comunicación como el cine, la televisión y la radio.

En 1939 durante la Exposición universal de Nueva York , la empresa Sawyer introduce un nuevo estereoscopio: el View-Master inventado por William Gruber (Fig9). Usa negativos de 7 pares de imágenes estéreo dispuestas a modo de cartón circular que se van visualizando secuencialmente a través de un visor doble que hace que cada ojo vea la imagen que le corresponde. La utilidad del dispositivo además de la meramente lúdica fue muy amplia. Durante la Segunda Guerra Mundial el ejército americano lo usó para que sus soldados visualizaran los barcos y aviones enemigos. Fue una vía de divulgación de viajes, naturaleza, arquitectura, historia... Cabe destacar que fue una de las primeras vías de uso de la estereoscopia en el campo de la anatomía humana que hemos registrado. Desde 1948 hasta 1962 David L. Basset

(anatomista) en colaboración con Gruber recopila 221 View-Masters conteniendo 1554 imágenes en estéreo de disecciones anatómicas⁵¹.

En los años 50 surgen dos acontecimientos que relanzan el interés por la estereoscopia. Uno de ellos fue el cine 3D. Aunque como ya revisamos con anterioridad existen antecedentes de películas filmadas con estereoscopia, es durante la mitad del siglo XX cuando se popularizan estas películas. Aunque muchas de ellas se proyectarán en formato 3D anáglifo se inicia la proyección basada en polarización. La calidad de las películas proyectadas con este formato no llegó a ser suficiente para ganar el respeto de crítica y espectadores. Existe una tendencia a pensar en películas de serie B cuando se habla del cine 3D de aquella época⁵².

Otro hito a destacar fue la proliferación de cámaras estereoscópicas de uso casero. Una de las más famosas fue la Stereo Realist producida por David White Company a partir de 1947.). Venía a publicitarse como la “cámara que ve lo que usted ve”. Asimismo en 1952 Sawyer saca al mercado las cámaras del View Master para poder capturar las propias fotos que se verán con el aparato manufacturado por ellos mismos⁵³.

Tras un periodo de cierto estancamiento en cuanto a las mejoras tecnológicas durante las décadas de los 60 a 90, en la actualidad, el uso de la estereoscopia en los ámbitos académicos y de entretenimiento se ha visto de nuevo relanzado por los avances en el campo de la informática.

La creación del IMAX 3D permitió crear un cine 3D de alta calidad que ha supuesto una revolución en el mundo del cine actual. IMAX (acrónimo en inglés de **I**mage, imagen, y **MAX**imum, máximo) es un formato de cinta de video y un estándar de proyección cinematográfica creado por una compañía canadiense IMAX Corporation . IMAX tiene la

capacidad de grabar y mostrar imágenes de mucho más tamaño y resolución que los sistemas de películas fotográficas convencionales. Desde el 2002, algunas películas han sido convertidas, o mejoradas, a formato IMAX para ser mostradas en salas de cines preparadas a tal efecto, así como muchas desde entonces han sido filmadas en ese formato. Para crear la ilusión de profundidad tridimensional, el proceso de IMAX 3D utiliza dos lentes de la cámara para representar a los ojos derecho e izquierdo. Las dos lentes están separadas por una distancia interocular de 64 mm, la distancia media entre los ojos de un ser humano. En la grabación en dos rollos de película por separado para los ojos derecho e izquierdo, y luego se proyecta de forma simultánea creando la sensación de profundidad propia de la estereoscopia. El director de cine James Cameron populariza este instrumento cinematográfico con el éxito de la película Avatar rodada en 3D⁵⁴.

El concepto de Realidad Virtual es clave para entender el uso académico actual del 3D. Los modelos actuales de realidad virtual se basan en la creación de entornos ficticios pero que simulan la realidad por métodos digitales. Aunque estos métodos son ya de por sí útiles con imágenes biplanares, la estereoscópica aumenta significativamente la percepción de realidad por el usuario. La estereoscopia tradicional se basa en la adquisición con fotografía de dos imágenes con desplazamiento lateral una de otra. Sin embargo, el avance de la tecnología digital actual permite construir un par de imágenes estereoscópicas de un entorno ficticio a partir de los datos almacenados en una base de datos sin necesidad de realizar la difícil tarea de la doble captura fotográfica. En cuanto al modo de proyectar las imágenes, la realidad virtual se ha beneficiado del llamado **casco de realidad virtual**, también llamado **gafas de realidad virtual** o **HMD**

(del inglés *Head-mounted Display*), es un dispositivo de visualización similar a un casco, que permite reproducir imágenes creadas por ordenador sobre una pantalla muy cercana a los ojos o proyectando la imagen directamente sobre la retina de los ojos.

Debido a su proximidad con los ojos el casco de realidad virtual consigue que las imágenes visualizadas resulten mucho mayores que las percibidas por pantallas normales, y permiten incluso englobar todo el campo de visión del usuario. Gracias a que el casco se encuentra sujeto a la cabeza, éste puede seguir los movimientos del usuario, consiguiendo así que éste se sienta integrado en los ambientes creados por ordenador. Con estos dispositivos es relativamente fácil conseguir que la estereoscopia sea percibida correctamente por el espectador, ya que recibirá una imagen diferente en cada ojo⁵⁵. Además de este método de proyección, contamos con los métodos de proyección pasivo y activo que ya hemos comentado con anterioridad. En cuanto al uso del 3D en neuroanatomía existen varios antecedentes que se remontan a mediados del siglo XX. “The stereoscopic atlas of human anatomy” es publicado en 1961 por Bassett con el método View Master de Sawyer^{56,57}. Además se usó el propio dispositivo manual de visualización individual que ya comentamos en páginas anteriores, crea un proyector View Master especial basado en el método de proyección pasiva 3D. Este mismo método es usado para la proyección de otros dos atlas de anatomía: el “Stereo Atlas of Operative Microneurosurgery” de Poletti C.E. y Ojemann R.G. en 1985 y más tarde el “Microsurgical Anatomy of the Brain: A Stereo Atlas” de Kraus G.E. en 1994.

Actualmente, el uso de la estereoscopia en la bibliografía neuroquirúrgica queda limitado a la impresión de fotografía en método anáglifo, dado que es el único método que no requiere un dispositivo

especial de proyección sino que puede ser contemplado desde cualquier pantalla de ordenador o cualquier papel con el simple uso de unas gafas azul y rojas. En cuanto a la temática de los artículos publicados se ha trabajado principalmente con la anatomía cerebral y la anatomía microneuroquirúrgica ⁵⁸⁻⁶². Sin embargo, Aunque el uso de endoscopios 3D en neurocirugía se ha analizado en varios trabajos⁶³⁻⁷⁰, la publicación de trabajos docentes de anatomía endoscópica no tiene antecedentes. Además de ser una técnica en reciente evolución, el método de adquisición de imágenes estereoscópicas con endoscopios convencionales (2d) es algo complejo, como ya explicaremos más adelante⁷¹.

El uso actual de la estereoscopia en la docencia de la neuroanatomía quirúrgica tiene su lugar principalmente en la proyección polarizada de imágenes y videos 3d a grupos de alumnos tanto en universidades como en cursos y congresos.

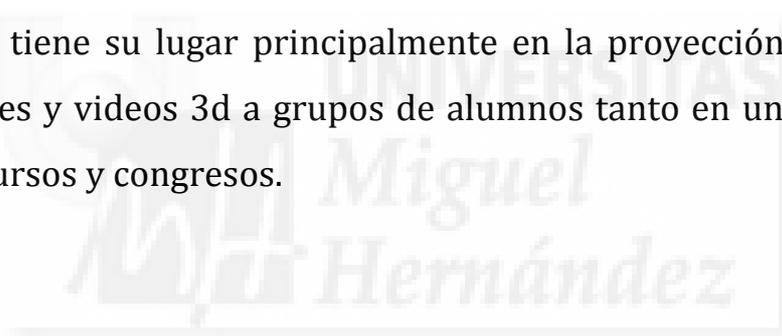




FIG 9. Imagen del View-Master. Estereoscopio inventado por William Gruber

3.6 Planteamiento actual del problema

El neurocirujano actual debe conocer de forma detallada la anatomía de la región que va a tratar . A diferencia de otras especialidades médicas, este conocimiento de la anatomía no sólo debe ser desde un punto de vista conceptual o funcional, es imprescindible tener una integración espacial casi perfecta de las estructuras a las que se va a enfrentar. Como ejemplo, si vamos a tratar un tumor del nervio vestibular alojado en el ángulo ponto-cerebeloso, es imprescindible saber qué nervios nos vamos a encontrar en relación al tumor, qué vasos podemos encontrar adheridos a éste, qué huesos y senos venosos van a servir de límite para nuestro abordaje o qué porción de cerebelo o tronco-encéfalo vamos a tener que separar para extraerlo. Para que el neurocirujano se pueda familiarizar con esta anatomía de una forma cercana a la realidad existen muchas herramientas.

Sin duda la más real y efectiva es la propia práctica quirúrgica puesto que es una forma directa de enfrentarse al problema e ir adquiriendo un entrenamiento in situ de esa anatomía. Sin embargo, como es lógico, se trata de un aprendizaje poco seguro para la práctica asistencial puesto que el neurocirujano poco experimentado se entrenaría con un paciente vivo y puede suponer un riesgo asociado a la inexperiencia.

Por otro lado, otro método que se acerca mucho a la realidad y que no condiciona esos riesgos va a ser la práctica en cadáver. Hablamos de un ambiente en el que las estructuras anatómicas guardan mucha similitud con el paciente vivo sin asociar el riesgo de complicaciones. Sin embargo, este método es a veces poco accesible a los neurocirujanos y resulta en ocasiones poco verosímil en según qué casos.

En cuanto al material bibliográfico clásico, la gran mayoría de recursos relacionados con la anatomía y en concreto la neuroanatomía quirúrgica están desarrollados a modo de ilustraciones o fotografías en cadáver o en vivo. Estas fotografías o ilustraciones pueden llegar a ser muy intuitivas para la docencia básica puesto que permiten tener un conocimiento superfluo de la localización y relación de estructuras. Sin embargo, si lo que queremos es simular la realidad a la que nos vamos a enfrentar en quirófano y conocer perfectamente la relación espacial exacta de los elementos, la visualización de estas en formato tridimensional es fundamental. Se está desarrollando un arsenal cada vez mayor de recursos digitales que están permitiendo manejar la anatomía añadiendo a ésta el fenómeno de la profundidad y el volumen. Nuestro trabajo pretende revisar y servir de compendio a las técnicas de adquisición y proyección de imágenes estereoscópicas en el campo de la neuroanatomía quirúrgica. Se trata de llevar la imagen 3d real del cadáver o la cirugía al usuario que consulta una fuente bibliográfica ya sea papel, blog de internet, artículo científico, libro o mientras visualiza una proyección.



4-HIPOTESIS DE TRABAJO Y OBJETIVOS

4.1 HIPÓTESIS FUNDAMENTAL.

- La aplicación de la estereoscopia en la neuroanatomía básica, académica y clínica es una herramienta útil para su aprendizaje. La unificación en un trabajo de todos éstos métodos permitiría hacer reproducible este modo de enseñanza en otros centros y por tanto facilitar el aprendizaje de la neuroanatomía básica, académica y quirúrgica.

4.2 OBJETIVOS GENERALES

- La adquisición de pares de fotos estereoscópicas y su procesado en formato 3D permite visualizar de modo virtual la posición real de las estructuras neuroanatómicas y la relación de unas con otras.
- El uso de la estereoscopia podría sustituir a la visualización directa de especímenes o cirugías y por tanto servir de complemento en el aprendizaje real de la anatomía y en particular de la neuroanatomía.

4.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir la técnica necesaria para adquirir las imágenes estereoscópicas en las diferentes modalidades de visualización neuroquirúrgica así como el modo de proyectarlas.
- Mostrar en imágenes el producto obtenido con la aplicación de estas técnicas, sus ventajas y su aplicabilidad en la docencia e investigación de la neuroanatomía.



5. MATERIAL Y MÉTODO

5.1 Material y métodos de captura

5.1.1 Laboratorio de anatomía

Este trabajo de investigación se ha desarrollado principalmente en la Universidad Miguel Hernández de Elche, Alicante (España) . Más concretamente en la sala de disección de la Facultad de Medicina del Campus de Sant Joan que dirige el Departamento de Histología y Anatomía, situado en la Carretera Nacional 322 de Sant Joan d'Alacant junto al Hospital Clínico de esa localidad. (Fig 10)

Se trata de un centro con una arraigada tradición en la investigación anatómica ya que cuenta con una alta tasa de donación de especímenes cadavéricos para fines docentes-académicos. Varios grados de la Universidad (Medicina, Enfermería, Fisioterapia, Podología y Terapia ocupacional) reciben formación anatómica en la sala. En sus instalaciones se celebran anualmente más de 20 cursos nacionales e internacionales que tienen como principal atracción el aprendizaje práctico sobre piezas cadavéricas. (Fig11) Además de la disponibilidad de especímenes el centro cuenta con excelentes medios técnicos y asistentes entrenados para preparar este tipo de prácticas.

El Departamento de Histología y Anatomía es dirigido por el Catedrático en Biología Celular Eduardo Fernández Jover. El secretario actual del Departamento es el Dr Vicente Almenar García y durante el periodo de realización de la mayor parte de esta tesis he contado con la ayuda de varios profesores y técnicos de apoyo: el Dr Francisco Sánchez del Campo (co-director de esta tesis y nombrado profesor

emérito) el Dr Jaime Lloret García (colaborador honorífico del departamento y compañero en el Servicio de Neurocirugía del Hospital de Alicante). El técnico de laboratorio D. Alfonso Sánchez de la Blanca Mesas y su equipo son los encargados del mantenimiento de la sala así como de la preparación de especímenes y mantenimiento de las piezas neuroanatómicas

Para la realización del trabajo experimental hemos utilizado un puesto de trabajo de la sala de disección dotado con 4 microscopios quirúrgicos de los cuales el que usamos para nuestra práctica fue el Microscopio Zeiss ®OPMI PICO. Disponemos además de un motor de alta velocidad con diferentes fresas para practicar craneotomías (Anspach eMax2®). (Fig 12)

No de forma permanente pero si con carácter temporal hemos dispuesto de una torre de endoscopia Storz equipada con cámara Full HD, óptica nasal de 4mm y 18 cm de 0º, 30º y 45º y de cajas de instrumental específicas para endoscopia nasal, de base de cráneo y ventricular.

Además el puesto de trabajo consta de un aspirador, 2 lámparas/flexos de pie, instrumental básico de disección para planos externos y microdisección, un dispositivo de fijación de cabezas de especímenes, irrigación y material fungible habitual de quirófano (batas, guantes, empapadores, etc..).

La sala de disección cuenta con las medidas higiénicas y de seguridad adecuadas aceptadas por el Ministerio.



FIG 10. Facultad de Medicina en el Campus de San Juan de Alicante. Edificio Severo Ochoa.



FIG 11. Sala de disección de la Facultad de Medicina.

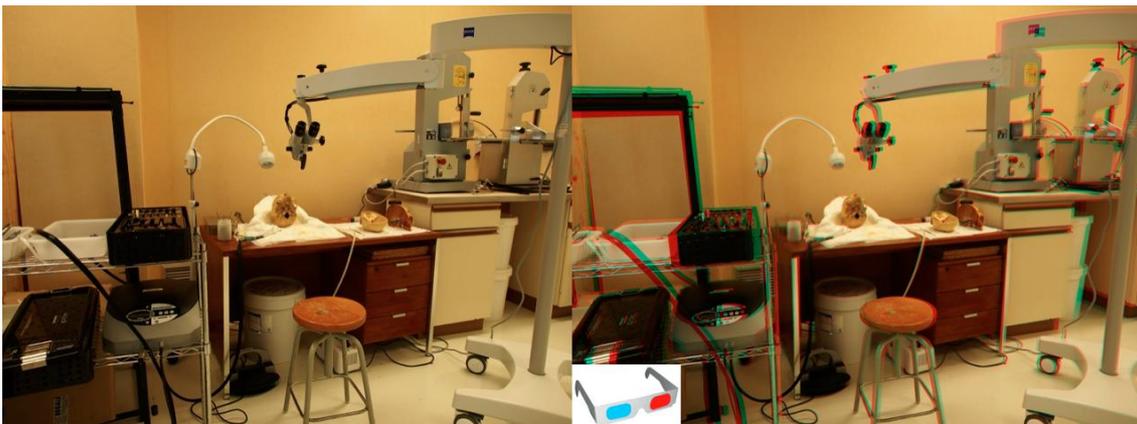


FIG 12. Laboratorio de Neuroanatomía donde se ha realizado el trabajo de disección y de adquisición de fotografías de la presenta tesis.

5.1.2 Especímenes cadavéricos: preparación

Las disecciones anatómicas han sido realizadas sobre piezas anatómicas que han sido preparadas en el departamento de anatomía durante el periodo comprendido entre 2010 y 2015.

De forma general se ha trabajado con tres modos de preservación:

- Formol.
- Thiel.
- Klingler (para fijación y disección de tractos de fibra blanca)

-Formol.

La técnica más empleada fue la primera. La preparación del espécimen comienza con la disección de ambas arterias carótidas, arterias vertebrales y venas yugulares. Ha de exponerse al menos 2 centímetros de cada vaso para conseguir una canulación de mayor calidad. Las cánulas se introducen en la luz de dichos vasos y se fijan con sedas. Es preferible que las cabezas se corten en niveles cervicales más bajos para que sea más fácil esta maniobra. La canulación más compleja suele ser la de la arteria vertebral. Para canular se usa cualquier tubo de silicona, en nuestro caso sondas uretrales de diferente calibre. Este paso de la preparación es crucial para poder instilar en los diferentes vasos los fluidos que deseamos inyectar.

El primer paso es desobstruir los vasos de coágulos originados en el momento de la muerte. Para que este procedimiento sea más sencillo se eligen especímenes con no más de 48 horas desde el deceso.

En un primer momento se inyecta agua corriente a presión a través de los vasos. Se inyecta primero a través de una carótida mientras se

dejan clampadas las vertebrales y yugulares para comprobar la permeabilidad de la carótida contralateral.

El mismo procedimiento se realiza clampando carótidas y yugulares para desobstruir las vertebrales. Y finalmente se realiza con yugulares manteniendo ocluidas las 4 arterias (carótidas y vertebrales). No tenemos un tiempo fijo de irrigación ni una cantidad de agua establecida. El procedimiento se realiza hasta que se observa que la salida del agua por el sistema vascular es transparente. La irrigación es manual y usamos jeringas de 50cc.

Una vez que el sistema arterial y venoso queda limpio. Procedemos a la fijación del mismo con la inyección del formolal 15% por las cánulas preparadas previamente. Tras su adecuado relleno, se cierran las cánulas y se sumerge el espécimen en formol al 10% durante 72 horas. Para conseguir una mejor preservación del tejido cerebral se prolongará este tiempo.

Pasado este periodo se procede a la reapertura de las cánulas y de nuevo a un lavado de los vasos con agua corriente hasta limpiar los restos de formol. Después, para conseguir colorear los vasos sanguíneos se inyecta una mezcla de látex y colorante rojo en el sistema arterial y azul en el venoso. No tenemos una cantidad establecida de látex y colorante para la mezcla sino que nos guiamos por la textura que adquiere previa a su inyección. El liquido obtenido no debe ser excesivamente espeso si queremos alcanzar el sistema capilar más distal.

El tiempo de espera antes de iniciar una disección en el espécimen preparado debe ser de al menos 72 horas.

Una vez preparado el espécimen, el cubo en el que se conserva se rellena de una mezcla de $\frac{1}{4}$ de formol y $\frac{3}{4}$ de agua⁷² (Fig 13)

-Thiel

Se basa en 3 procesos: fijación, desinfección y preservación, con soluciones que contienen 4cloro3metilfenol + varias sales; ácido bórico y etilenglicol como componentes básicos. En primer lugar se lleva a cabo un lavado profuso con agua tibia corriente de todo el árbol vascular y sus cavidades. Se administra la solución descrita por Thiel, por vía intravascular (por arterias carótida y femoral) incorporando esta misma mezcla por vía de los tractos aéreos, esófago-gástrico y colónico. Una vez incorporada en el cadáver la solución de inyección en forma completa, se procede a colocar el cuerpo en una pileta que contiene otra mezcla propuesta por el citado autor, correspondiente a la solución de inmersión. El tiempo de inmersión en esta solución es de 30 días.

Pasado el período establecido de inmersión, el cadáver se extrae de la pileta y se conserva simplemente en una bolsa de plástico con cierre de cremallera. Se debe realizar la inmersión periódica del cadáver sólo para mantener la humedad de los tejidos cuando aparezcan signos de desecación de los mismos. Las inmersiones periódicas tienen una duración de 7 días aproximadamente.

Este método permite una conservación prolongada, manteniendo el color, textura, plasticidad y flexibilidad del espécimen fresco. Una desventaja de la técnica está en que el tejido encefálico y medular no se preserva de forma correcta y sufre cierta licuefacción. Por tanto para nuestro trabajo de disección y fotografía lo utilizamos especialmente en los tejidos blandos musculocutáneos y para las disecciones de base de cráneo endonasal por la excelente preservación de la mucosa nasal⁷³. (Fig14)

-Klinger

Los encéfalos para la disección de fibra blanca fueron extraídos en fresco (en las primeras 12h postmortem). Tras realizar la craneotomía se cortaron los pares craneales a su entrada en la base del cráneo, así como las estructuras vasculares. Finalmente se realizó una sección a nivel del bulbo raquídeo.

Una vez extraídos se lavaron en agua corriente tratando de extraer el máximo número de coágulos intravasculares. Con el objetivo de preservarlos se embebieron en una solución de formaldehído al 10% flotando boca abajo tras pasar una sutura a través de la arteria basilar para evitar que cualquier parte del encéfalo estuviera en contacto con el continente. En esta solución los encéfalos estuvieron de 8 a 10 semanas. Mediante esta metodología el formol puede penetrar completamente en cada encéfalo, llegando incluso hasta los ganglios basales.

Tras este proceso se lavaron durante 4-6 horas bajo agua corriente y se congelaron a -15 C durante 12-14 días. De esta forma se consigue que el agua que existe entre las fibras, pueda cristalizar. Al hacerlo, los cristales de hielo separan las fibras que siguen distintas direcciones.

Tras la congelación, los encéfalos se preservaron en una solución de formaldehído al 5%, estando listos ya para la disección de fibras.⁷⁴(Fig 15)

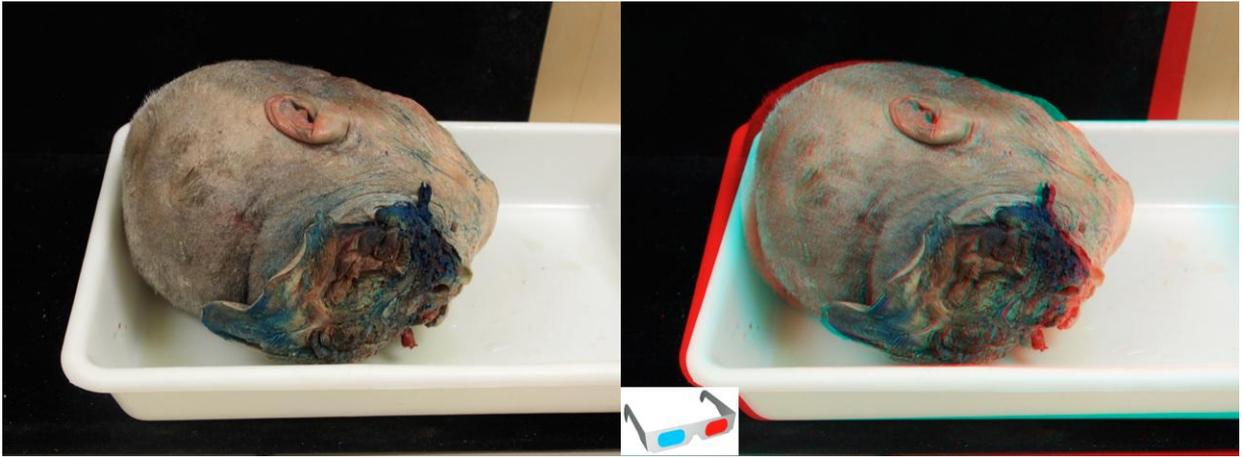


FIG 13. Espécimen conservado en formol e inyectado con latex azul y rojo

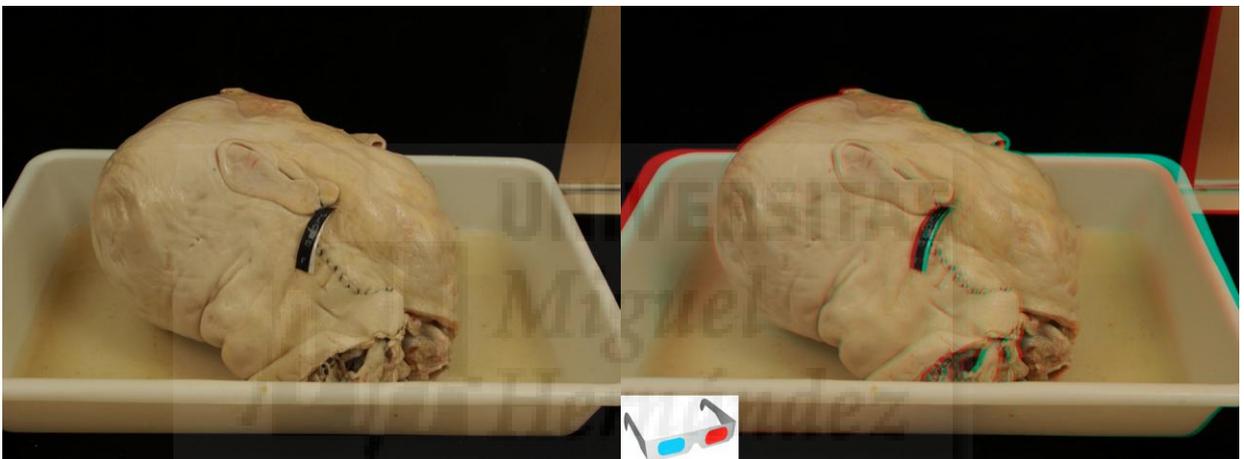


FIG 14. Espécimen conservado con la técnica de Thiel.

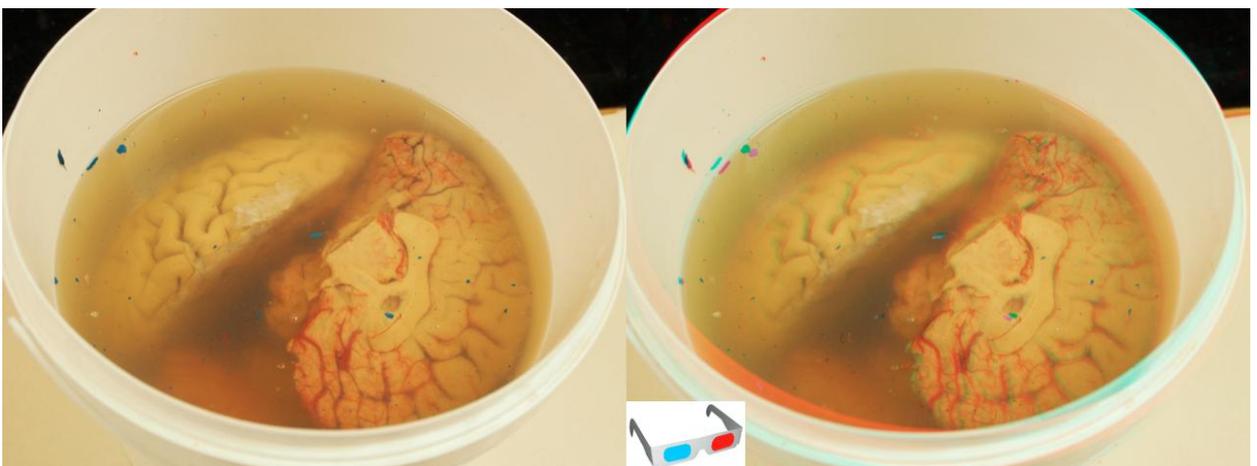


FIG 15. Encéfalos conservados con el método de Klinger.

5.1.3 Material de captura de imágenes estereoscópicas

Para el proceso de captura de imagen 3d usamos diferentes dispositivos en función del tipo de escenario en el que nos encontramos.

Resumiendo podemos realizar fotografía 3d en los siguientes **escenarios neuroquirúrgicos:**

- *Fotografía en cadáver.*
 - Fotografía de piezas anatómicas a distancia (30-40 cms aprox) . Es la fotografía que hacemos a cerebros disecados, a piezas de hueso, a la superficie de una cabeza disecada. A nivel metódico, esta fotografía implica el uso de una cámara de fotos sin la necesidad de objetivos macro específicos y con facilidad para iluminar el área que queremos mostrar.
 - Fotografía de piezas anatómicas en detalle a través de campos profundos. La llamaremos “Microquirúrgica”. En este caso se trata de fotografiar regiones anatómicas que han sido disecadas simulando un abordaje anatómico. Este modo de fotografía implica el uso de un objetivo macro en la cámara y la necesidad de introducir la iluminación adecuada en la zona. Una alternativa es la fotografía a través de un microscopio que permita capturar la imagen analógica que se obtiene desde los oculares. La disponibilidad de microscopios con captura de imagen 3d es algo inalcanzable para un laboratorio convencional y se sustituye por la captura de una doble fotografía 2d a través de un microscopio convencional.

- Fotografía endoscópica. Del mismo modo que en la fotografía microscópica, un endoscopio con captura de imagen en 3d no está al alcance de un laboratorio cualquiera. Por ello, en nuestro caso usamos un endoscopio con óptica convencional y con la metodología que describiremos más adelante conseguimos la captura de fotos estereoscópicas.
- *Fotografía en vivo/ cirugía*.
 - En el caso de la captura 3d en quirófano, la metodología de adquisición que usamos en el laboratorio es difícil de aplicar. Tanto por la falta de tiempo para realizarla como por la dificultad de mantener el campo estéril usando los artilugios que en el cadáver sí podemos manejar. Por ello, en cirugía hemos podido contar con dispositivos que adquieren la imagen directamente en 3d tanto a nivel microscópico como endoscópico. Como veremos más adelante se trata de dispositivos novedosos que no están disponibles en todos los quirófanos convencionales y que, en nuestro caso, se han usado de forma temporal como demostración para la realización de esta tesis doctoral.

Material de captura de imagen :

- *Cámara fotográfica:* Olympus OM-D E-M10® con objetivos: 14-42mm como básico y portrait Zoom ED 40-150mm 1:4.0-5.6R para fotografía macro. (Fig 16)
- *Trípodes y barras de deslizamiento:*

- Trípode: Se puede usar cualquier trípode de fotografía. Lo importante para adquirir la fotografía 3d es poder realizar un desplazamiento horizontal de la cámara lo más preciso posible entre foto y foto. Para ello, se puede usar un trípode que disponga de una barra de desplazamiento horizontal incorpora o se puede adaptar una barra horizontal a un trípode convencional. En nuestro caso optamos por la segunda opción y adquirimos una barra aparte que se adapta al tornillo de anclaje del trípode por su parte inferior mientras que en su parte superior dispone de otro tornillo con el que anclar la cámara. Dispone además de una regla milimetrada para calcular la distancia de deslizamiento horizontal que necesitemos.
- Barra de desplazamiento horizontal de propia manufactura. (Fig17) El uso del trípode es adecuado cuando hacemos fotografías a distancia de piezas aisladas o regiones anatómicas bien expuestas a la luz y al objetivo de la cámara. Estas fotografías las realizamos en una especie de “mini-escenario” creado con tablas y tela de color negro en cuyo centro situamos la pieza. Sin embargo, cuando tratamos de fotografiar disecciones más profundas y necesitamos que nuestra pieza anatómica no tenga que ser sacada de la mesa de disección el trípode no resulta útil. Hay que tener en cuenta que la pieza suele estar sujeta a la mesa con un dispositivo de fijación craneal difícil de trasladar. Para ello fabricamos un dispositivo más versátil y fácil de trasladar: consistente en una tabla rectangular de

madera de unos 3 cms de ancho y 18 cms de largo a la que se adaptó una guía de deslizamiento de bolas y rodamientos de aluminio (habitualmente usada para deslizar cajones de armario) a la que, a su vez, se insertó un tornillo similar al usado por trípodes para ajustar y fijar cámaras de foto. Este mecanismo de deslizamiento es el mismo que tendríamos con la barra del trípode. La tabla se sujeta a ambos lados por 2 patas hechas cada una de ellas de barras de aluminio de diferentes diámetros que permitirían modificar la altura de la barra. Asimismo, la barra horizontal se ajusta con las patas de forma que puede inclinar y rotar su plano hasta 45°. Con este dispositivo de poco peso y fácil de transportar logramos fotografiar fácilmente las disecciones sin necesidad de extraer la pieza de la zona de trabajo.

- *Iluminación:*
 - El propio flash de la cámara de fotos. En caso de fotografía de una pieza en la que queremos adquirir un plano general y no hay zonas profundas que generen sombras. Por ejemplo: un hemisferio cerebral o la calota craneal.
 - Flash Anular LED Aputure Amaran® montura UNIVERSAL, con anillos adaptadores de diámetros: 52, 55, 58, 62, 67, 72mm para ajustar con los objetivos de la cámara. Especialmente útiles para fotografía cercana aunque no del todo recomendable si el campo es muy estrecho y profundo ya que en estos casos el diámetro

del flash queda muy grande y se pueden formar sombras con en movimiento de paralelaje de la foto 3d. (Fig 16)

- MAL-1: un kit de flash macro compuesto por dos “antenas” flexibles con luces LED. Se adapta a la ranura de flash de la cámara. Aunque parezca muy simple y rudimentario, en nuestra experiencia es el mejor método de iluminación para campos profundos en los que necesitamos introducir la iluminación de forma muy precisa para no crear sombras cuando realizamos el desplazamiento lateral de la cámara entre una foto y otra. (Fig 16)
- Lámparas/plexo de pie adaptables.
Muy sencillo de usar cuando fotografiamos piezas a cierta distancia. En la fotografía de disecciones de fibra blanca cerebral, el uso de estas lámparas da lugar a un sombreado que favorece la sensación de profundidad creada en las estructuras disecadas.
- *Dispositivo de captura de imágenes desde microscopio.* Para poder obtener fotografías desde nuestro microscopio analógico utilizamos un dispositivo que permitía capturar la señal S-Video que emitía. Se trata de un dispositivo Mac compatible denominado Elgato video capturer®. (Fig 18)



FIG 16. *Arriba-izquierda*: Olympus OM-D E-M10® con objetivos: 14-42mm como básico y portrait Zoom ED 40-150mm 1:4.0-5.6R para fotografía macro.
Arriba-derecha: MAL-1: un kit de flash macro compuesto por dos “antenas” flexibles con luces LED.
Abajo: Flash Anular LED Aputure Amaran® montura UNIVERSAL, con anillos adaptadores de diámetros: 52, 55, 58, 62, 67, 72mm para ajustar con los objetivos de la cámara.

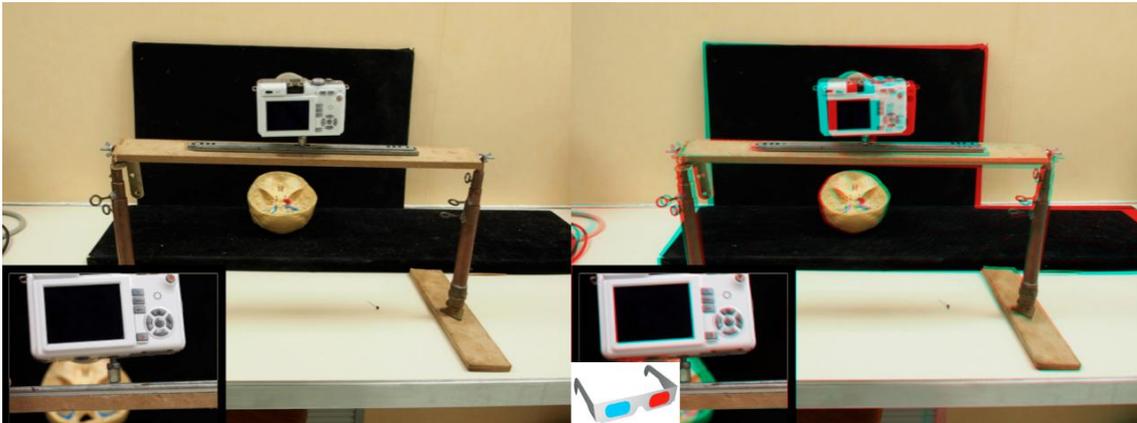


FIG 17. Barra de deslizamiento horizontal de propia manufactura para cámara fotográfica. Permite ajustar la cámara de fotos y realizar deslizamientos sobre un plano horizontal de una forma controlada.



FIG 18. Dispositivo de captura digital de imagen analógica Mac compatible denominado Elgato video capturer®. Nos permite adquirir las imágenes del microscopio óptico y manejarlas en nuestro ordenador.

- *Microscopio quirúrgico 3d:* el microscopio quirúrgico por definición permite al cirujano obtener una imagen 3d a través de los 2 oculares de su cabezal. Sin embargo, el microscopio sólo graba la señal de uno de los oculares de forma que el formato de imagen que exporta es 2d. Tal y como explicábamos, la captura de imagen 3d (fotografía y video) en cirugía ha avanzado con el uso de dispositivos que permiten capturar la imagen que se obtiene desde cada ocular del microscopio. Este es el principio con el que funciona el sistema *Trenion*® que Zeiss nos prestó durante 2 meses (Febrero y Marzo de 2016) y que adaptamos a nuestro microscopio quirúrgico habitual *Pentaro Opmi 900*® . (Fig19 y 20)
- *Endoscopio 3d:* Los endoscopios quirúrgicos convencionales, a diferencia de los microscopios, nos aportan una imagen 2d. La sensación de profundidad necesaria en la cirugía la dan todos los mecanismos indirectos que estudiamos en la introducción. Sin embargo, la ingeniería está trabajando en la obtención de ópticas y cámaras que recojan a través de la óptica una doble imagen que permita obtener la imagen estereoscópica deseada. En nuestro departamento hemos realizado 2 pruebas en cirugía con diferentes dispositivos. La primera fue en el año 2012 con un endoscopio comercializado por *visionsense*®. La experiencia con el dispositivo no fue del todo

satisfactoria ya que la amplitud del campo de visión y la definición obtenidas nos resultaron peores que con los endoscopios convencionales Full HD 2d.

La segunda prueba fue con el nuevo endoscopio 3d de Storz TIPCAM® S 3D ENT. (Fig 21).



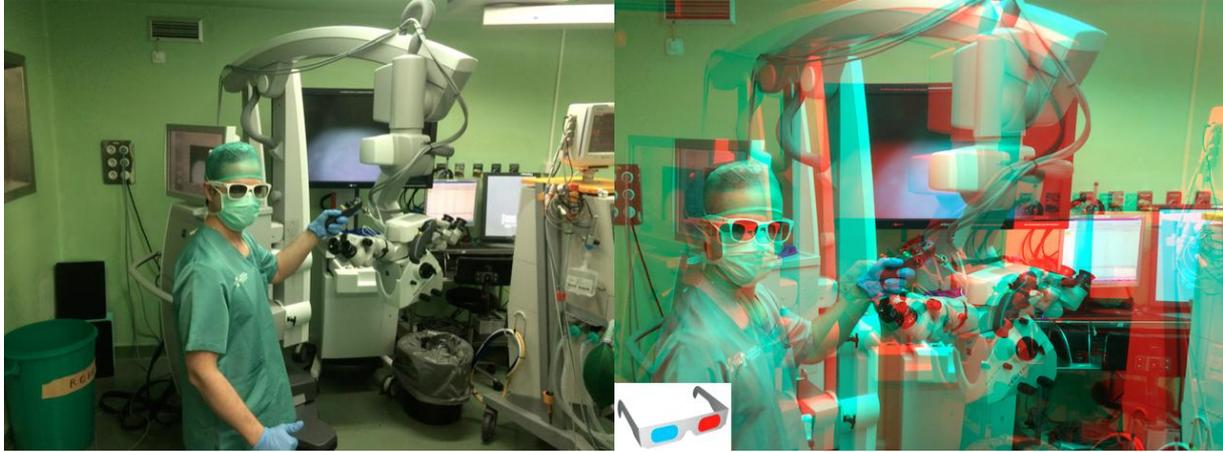


FIG 19. Microscopio ZEISS PENTERO® con el captador 3d Trenion ®.

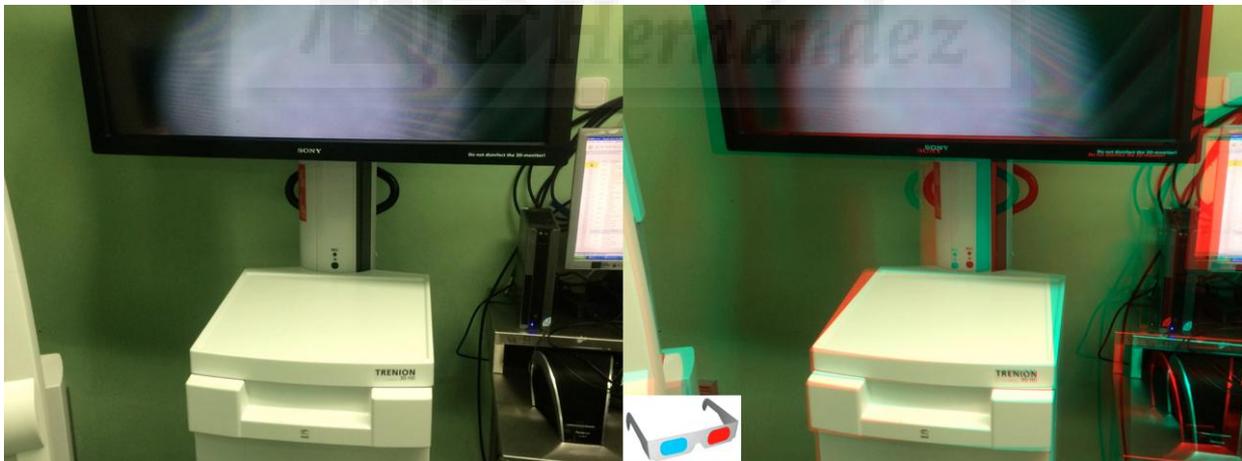


FIG 20. Capturador 3d desde Microscopio tipo Trenion ®.

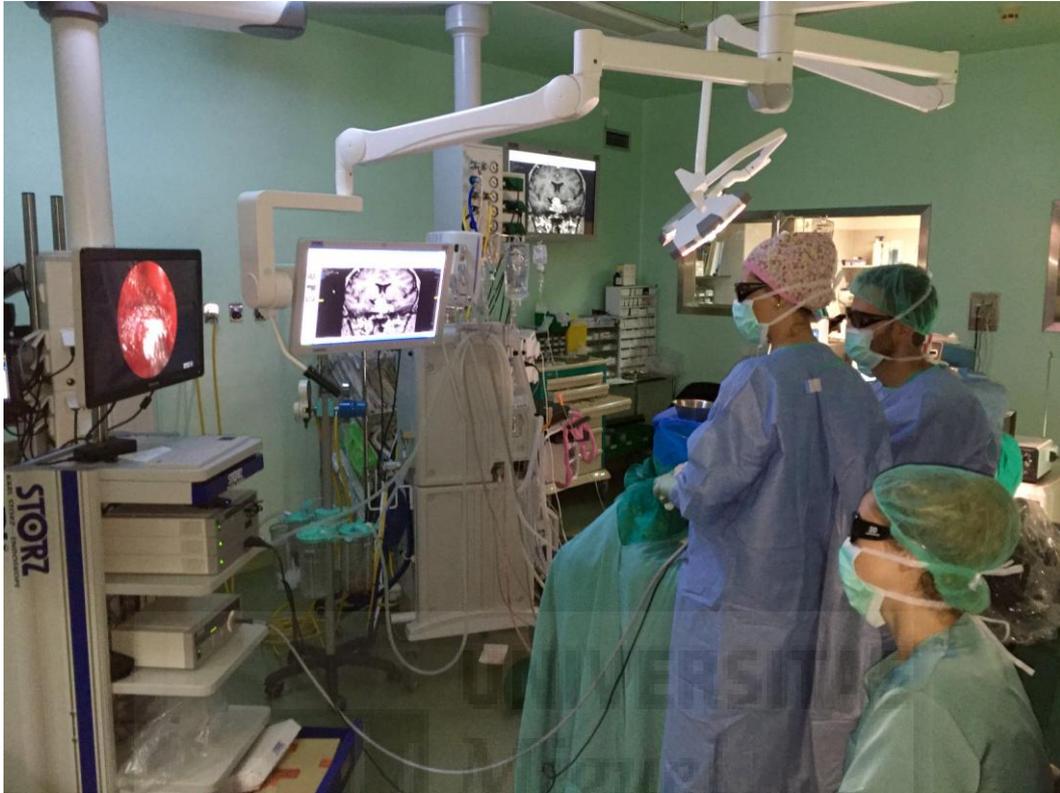


FIG 21. Cirugía endoscópica endonasal con uso de la cámara Storz TIPCAM® S 3D ENT. Cirugía realizada con la colaboración de la Dra Irene Monjas del Servicio de ORL del Hospital de Alicante.

5.1.4 Métodos de captura de imagen:

La metodología de obtención de imágenes estereoscópicas en el laboratorio se basa en los principios básicos de la estereoscopia que tratamos en la introducción. Aunque se trata de una práctica ya conocida, el objetivo de nuestra tesis es revisar y agrupar en un trabajo los diferentes detalles técnicos que son de utilidad para la adquisición de fotografía estereoscópica en el campo de la neuroanatomía quirúrgica. Para sistematizar los métodos de captura volvemos a establecer **3 escenarios de captura:**

- Fotografía de piezas anatómicas aisladas.
- Fotografía de abordajes microquirúrgicos.
- Fotografía de abordajes endoscópicos.

Cada uno de ellos tiene en común los materiales de adquisición de imágenes, la técnica de captura y la iluminación.

- *Fotografía de piezas anatómicas aisladas.*

Es el método más sencillo. Lo utilizamos para fotografiar la superficie de piezas anatómicas en las que el área a fotografiar está bien expuesta y superficial. Hablamos de fotografiar diferentes tipos de piezas: planos generales o abordajes poco profundos en cabezas formoladas o de Thiel ; cráneos completos seccionados o huesos aislados y encéfalos conservados en Klinger en los que fotografiamos la superficie o disecciones de fibra blanca. En lo que al material se refiere usamos la cámara fotográfica para la captura, el flash propio o las lámparas/flexos de pie para la iluminación y como dispositivo de adquisición usaremos el trípode con barra horizontal preferiblemente. Cuando tomamos un plano

general de una pieza y queremos que ésta aparezca de forma completa sobre un fondo, habitualmente preparamos una especie de escenario con 2 tablas (una de suelo y otra de fondo) y las cubrimos con un paño negro. De esta forma conseguimos que resalte el objeto fotografiado y además, en el procesado posterior de la foto con software, podemos fácilmente eliminar el fondo real de la foto y darle un color negro homogéneo. Para adquirir el par de fotografías estereoscópicas es preciso un proceso sencillo pero sistemático. Imaginemos que vamos a fotografiar una calavera en una vista puramente frontal y queremos obtener un plano general de ésta. En primer lugar hemos de ubicar nuestra pieza en el centro del escenario que comentábamos. La cámara ajustada al trípode estará colocada a la distancia que deseemos, por ejemplo a 60 cms. Antes de hacer la fotografía intentaremos que la línea de nuestra barra horizontal de fotografía (aquella sobre la que se va a desplazar nuestra cámara) forme una perpendicular aproximada con el punto central de la pieza anatómica que queremos fotografiar, en nuestro caso, tomamos la glabella como punto de referencia del objeto. Este punto, además va a ser de utilidad ya que el enfoque de las dos fotografías se centrará en él. Un aspecto a tener en cuenta es la distancia que queremos tomar entre foto y foto. Si recordamos los principios físicos de la estereoscopia, esta distancia que simula la distancia interocular (DIO) va a influir en la percepción del 3d. De modo que a mayor distancia entre las dos fotos, mayor percepción del 3d. Sin embargo, ya aprendimos que el alejamiento excesivo entre las dos

capturas provocaría una sensación de 3d que podría ser molesta. El principal factor que marca la DIO idónea va a ser la distancia de la cámara al objeto (d). El equilibrio ideal para la captura está en la relación $DIO/d=1/30$. De modo que en nuestro caso, para obtener una fotografía óptima del objeto situado a 60 cms de distancia, daremos un desplazamiento de 2 cms entre foto y foto. Siguiendo esta norma y partiendo de una cámara que se encuentra completamente perpendicular a la glabella del cráneo (punto 0 de desplazamiento), empezaremos a realizar la primera fotografía del par estereoscópico desplazando un centímetro la cámara a la izquierda (punto -1 de desplazamiento) y enfocando en el centro de la fotografía la glabella. (Fig 22) Una vez tomada la primera foto, desplazamos horizontalmente la cámara 2cm a la derecha para situarnos en el punto +1 de desplazamiento. Si miramos a la pantalla o visor de nuestra cámara veremos que nuestro punto de enfoque se ha desplazado con el movimiento horizontal (Fig 23) , por lo que la giraremos ligeramente para enfocar de nuevo la glabella en el centro. (Fig 24). Adquirimos así la segunda fotografía del par habiendo cumplido la regla de $1/30$ establecida. La secuencia de adquisición de las fotografías: primero izquierda y luego derecha es algo arbitrario, sin embargo resulta útil tomar una regla fija de captura para facilitar después la identificación de cada foto del par al hacer la descarga de imágenes desde la cámara.



FIG 22. Adquisición de la primera fotografía del par estereoscópico correspondiente al ojo izquierdo. Se ha tomado la glabella como punto para enfoque.



FIG 23. Desplazamiento horizontal derecho de la cámara de unos 2-3 cms. Véase como el punto de enfoque de la cámara se desplaza también hacia la derecha.

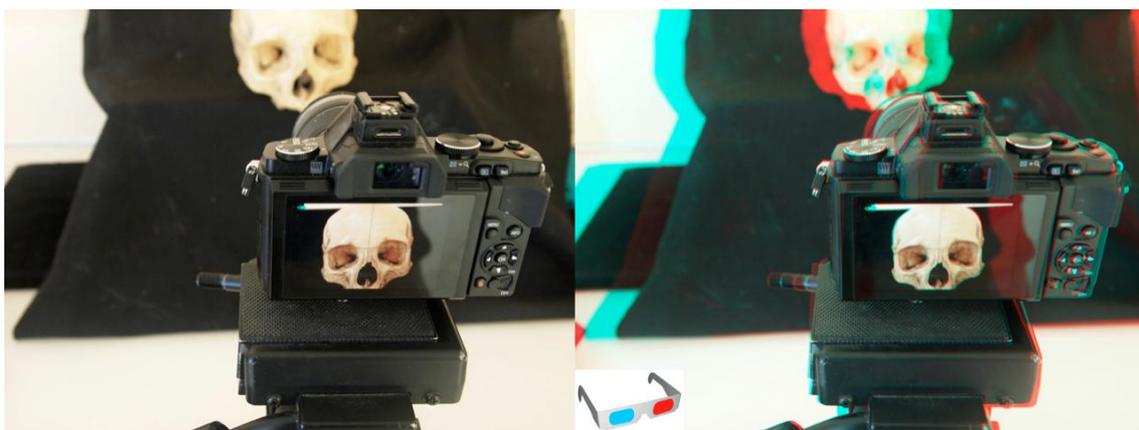


FIG 24. Se realiza un giro de la cámara fotográfica para recuperar el punto de enfoque inicial (en nuestro caso la glabella). Se adquiere así la segunda fotografía del par estereoscópico correspondiente al ojo derecho.

- *Fotografía de abordajes microquirúrgicos.*

En este caso tratamos de fotografiar áreas de piezas anatómicas que muestran de forma natural o tras una disección cierto grado de profundidad que hace necesario un enfoque detallado de la zona así como una iluminación ajustada que minimice las sombras. Esta situación se nos da principalmente cuando fotografiamos abordajes neuroquirúrgicos que han sido previamente disecados. Por ejemplo una imagen del APC tras realizar una craneotomía retrosigmoidea. Para este tipo de fotografía, el método más sencillo sería capturar en 3d la imagen de un microscopio de alta definición de forma automática ya que el enfoque de la imagen y la iluminación estarían en óptimas condiciones. Sin embargo, como ya explicamos con anterioridad, estos dispositivos son muy caros para disponer de ellos en un laboratorio de anatomía convencional. Disponemos de dos alternativas para hacer la fotografía en estos abordajes en nuestro medio. Una de ellas es realizar una doble captura de la imagen procedente del **microscopio 2d**. Para ello necesitamos un capturador de imagen analógico-digital que nos permita fotografiar lo que vemos por el microscopio. La salida del micro, siempre nos va emitir la imagen de uno de los oculares, por tanto imagen en 2d. Sin embargo, podemos utilizar el cabezal móvil del microscopio para hacer un proceso de captura similar al realizado con una cámara de fotos y una barra deslizante. Situamos el brazo móvil del microscopio trazando una línea perpendicular con el área que queremos fotografiar y bloqueándolo de forma que el brazo

realice un giro en forma de compás que mantenga el punto de enfoque en la perpendicular. Enfocamos la zona anatómica que consideraremos centro de referencia (por ejemplo el VIII par craneal en el interior de un APC) de modo que hacemos una primera captura de la imagen que correspondería con la imagen izquierda. (Fig25) Después movemos el brazo del microscopio ligeramente a la derecha. En este tipo de fotografía es muy difícil saber la distancia exacta entre foto y foto. Sin embargo, hemos de tener en cuenta que, al trabajar con un enfoque muy aumentado, se reduce la distancia al objeto (d) y por tanto la DIO será mas reducida. Una vez hecho el movimiento a la derecha, volvemos a enfocar el punto de referencia y tomar una nueva captura. (Fig26)

La ventaja de éste método está en la facilidad de enfocar y de iluminar el objeto. Sin embargo, hay que tener en cuenta algunos inconvenientes. La técnica de adquisición no es fácil ya que para que el movimiento del cabezal del microscopio debería realizarse sobre un plano completamente horizontal para que el par 3d sea correcto. Esto implica que la pieza anatómica se tenga que posicionar de forma que el microscopio la enfoque de un modo muy concreto. Para ser estrictos, la línea que forman el cabezal del microscopio y al objeto a fotografiar deben formar una perpendicular con el suelo. Esta no es una posición habitual de trabajo ya que, por comodidad, solemos situar el cabezal con cierta angulación cenital sobre al área de trabajo. Otro inconveniente, al menos en nuestro laboratorio es que la definición de las fotografías obtenidas con este método no es óptima. La resolución

obtenida usando la señal S-Video emitida por el micro no supera los 800x600.



FIG 25. Método de captura de imágenes mediante el uso de microscopio convencional 2D. Esta imagen corresponde a la adquisición de la primera fotografía correspondiente al ojo izquierdo.

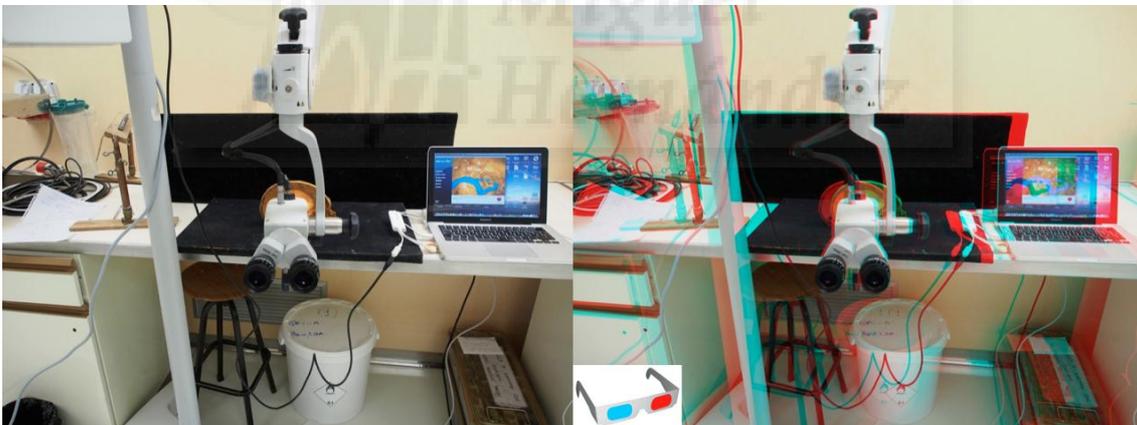


FIG 26. Método de captura de imágenes mediante el uso de microscopio convencional 2D. Esta imagen corresponde a la adquisición de la segunda fotografía correspondiente al ojo derecho. Se sigue el mismo principio de captura de imagen 3d explicado con la cámara convencional.

En nuestro laboratorio solemos emplear la **cámara de fotos** para adquirir las imágenes. El método de iluminación más empleado depende de la profundidad del campo. El flash anular permite proyectar una luz muy homogénea sobre al área fotografiada. Si bien, cuando nos enfrentamos a campos muy profundos, su excesivo diámetro, hace que el flash sea difícil de manipular y al realizar el desplazamiento horizontal entre fotos se crean sombras no deseadas. Por ello, encontramos más versátil el uso del flash MAL-1 consistente en 2 antenas maleables con luz led en su punta. Su pequeño diámetro hace más fácil la manipulación de la luz en estos campos. En lo que a la barra de deslizamiento respecta, la cámara preferimos adaptarla a nuestro sistema de captura manufacturado. La facilidad de adaptarlo al campo que queremos fotografiar sin necesidad de mover la pieza del puesto de trabajo, lo hacen especialmente útil para ésta. El mecanismo de captura es similar a cuando usamos trípode. Se coloca el dispositivo de barra horizontal de forma que se forme una perpendicular con la línea formada entre cámara y área a capturar y realizamos el par de fotos con el correspondiente desplazamiento horizontal de la cámara sobre la la barra. (Fig27 y 28)



FIG 27. Captura de imagen 3d en una pieza en la que se ha disecado previamente un abordaje quirúrgico. Se utiliza el dispositivo a modo de barra horizontal por su versatilidad a la hora de colocar la cámara cerca de cualquier punto a fotografiar. En esta fotografía se está capturando la imagen correspondiente al ojo izquierdo.



FIG 28. Similar fotografía que la anterior durante el proceso de captura de la imagen correspondiente al ojo derecho.

- *Fotografía de abordajes endoscópicos.*

Cuando queremos obtener fotografía 3d de una disección realizada con técnica endoscópica nos enfrentamos a una serie de dificultades técnicas. La fotografía endoscópica que mostramos en este trabajo es principalmente la relacionada con la vía de abordaje endonasal a la base del cráneo, si bien, hemos también trabajado en la disección y navegación endoscópica de algunas áreas intraventriculares. En primer lugar, hemos de subrayar que la disección de por sí es más compleja que cuando trabajamos en campos abiertos, especialmente si la disección la realiza una única persona. De este modo, una mano se emplea para sujetar el endoscopio mientras que sólo tendremos una mano libre para disecar. En cuanto a la captura de imagen hemos de recordar que nuestra cámara es el endoscopio. El punto de entrada de éste suele ser un orificio estrecho (la nariz o un trépano) por lo que no disponemos de la capacidad de maniobra con la que contábamos cuando usábamos una cámara. La técnica de captura se basa en realizar un mínimo desplazamiento horizontal entre una foto y otra. Aunque es muy difícil de calcular, estamos hablando de un desplazamiento de escasos mm. Si recordamos la relación 1/30 en milímetros, puesto que la distancia a la estructura a capturar en este caso se mueve en un rango aproximado de unos 30-60mm, el desplazamiento calculado entre las dos capturas será de unos 2mm. El principal hándicap de la técnica está en que el enfoque a un punto de referencia que necesitamos hacer en

cada captura requiere una rotación de la óptica que no siempre es posible por estar atrapada en un campo estrecho que es la nariz. De este modo, las dos fotografías capturadas se tomarán con un deslizamiento puramente horizontal del endoscopio sin rotaciones. Aunque esto simplifica mucho la técnica, el inconveniente está en que las fotos capturadas presentan diferencias significativas en su periferia. Como ya estudiamos en la introducción, esto incumple una de las normas de la perfecta estereoscopia. A pesar de que la visualización de las imágenes pueda ser algo más incómoda que en la fotografía de campos abiertos, el efecto se minimiza cuando el espectador trata de enfocar la atención sobre el centro de la imagen proyectada. Otra dificultad añadida está en que los endoscopios no disponen de marcas en la pantalla que nos marquen el punto central de enfoque. Dado que el desplazamiento horizontal de la óptica lo realizamos de forma manual, necesitamos una guía para que las dos fotografías tomadas se mantengan en un plano horizontal lo más exacto posible y evitemos deslizamientos no deseados de acercamiento/alejamiento, giros en sentido horario/antihorario o desplazamientos en el plano vertical. Para ello colocamos en la pantalla del endoscopio una cuerda o hilo formando una horizontal perfectamente paralela al suelo para que de esa forma el movimiento horizontal de la óptica sea lo más preciso posible(Fig 29).

En ocasiones, la captura endoscópica de la imagen se realiza en una disección abierta. Por ejemplo, en algunos especímenes en los que hemos resecado completamente la cavidad nasal y queremos fotografiar el esfenoides en su

interior. En este caso, la técnica de desplazar el endoscopio lateralmente y girarlo para enfocar el punto central de referencia, sí es posible. La fotografía en este caso se obtiene sin apenas diferencias en su periferia.

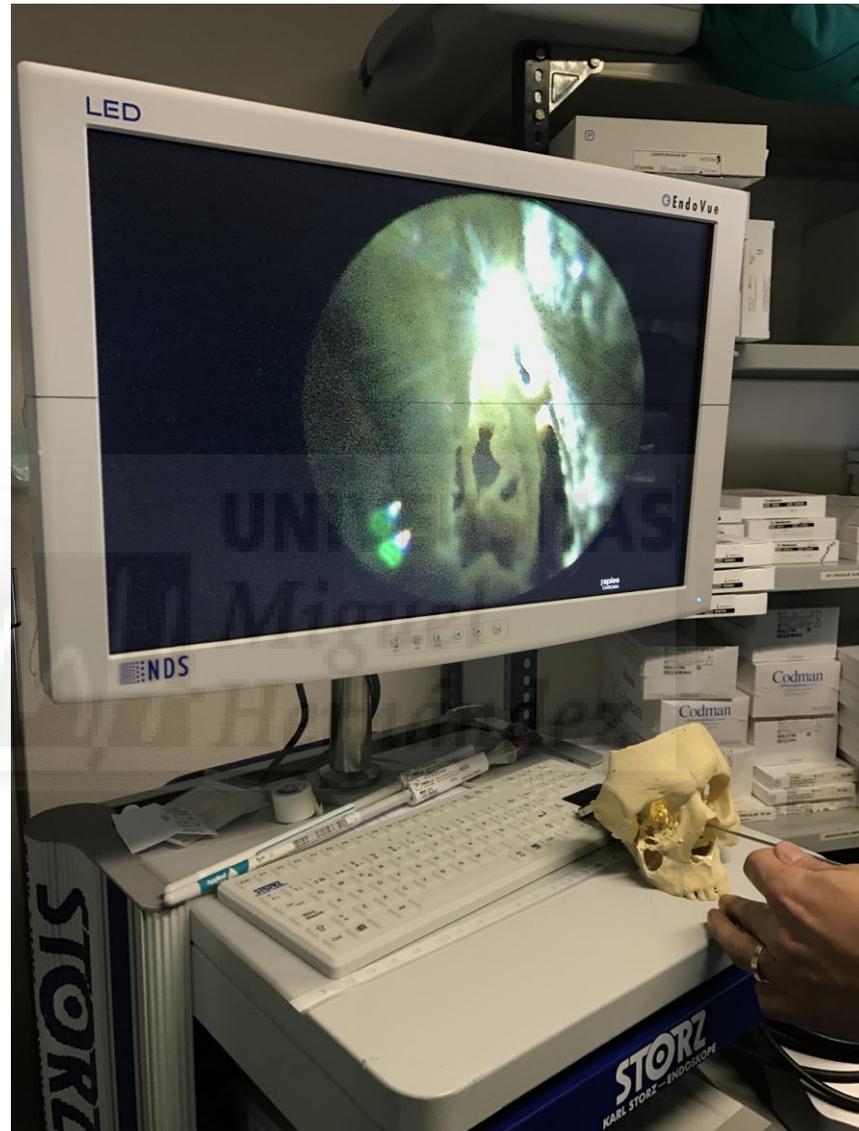


FIG 29. Ejemplo de adquisición de fotografía 3d durante una cirugía usando un endoscopio 2d convencional. Se puede apreciar el hilo que dejamos en horizontal de lado a lado de la pantalla y que sirve de guía para que el par de fotos estereoscópicas se hagan cumpliendo un desplazamiento preciso.

5.2 Material y métodos de proyección o impresión en 3d:

Una vez repasados los métodos de captura de imágenes, hacemos revisión de las técnicas empleadas para su proyección y divulgación.

Hemos de diferenciar dos grandes ámbitos de proyección de la imagen en nuestro trabajo:

- La proyección en **formato anáglifo** en pantalla convencional/papel.
- La proyección en **formato polarizado** en pantalla de proyección o monitor de proyección 3d.

5.2.1 Método de proyección/impresión en anáglifo.

Este método de proyección, como ya hemos indicado con anterioridad, tiene sus ventajas e inconvenientes. La principal ventaja radica en que la fotografía 3d que se crea puede visualizarse sin necesidad de pantallas especiales e incluso en formato papel. Sólo se precisan las gafas de visión en anaglifo (en nuestro caso rojo-azul). Esto hace que su alcance a los espectadores sea mayor y que éstos lo puedan visualizar cuando lo deseen. Sin embargo, la calidad de los colores y la comodidad para visualizarlas de forma prolongada no son óptimas.

En nuestro trabajo, hemos utilizado una aplicación informática preparada para que el montaje de la fotografía 3d sea sencillo. Se trata de la aplicación adaptada a Mac Anaglyph Workshop ® 2.8.1 by Sandy Knoll Software, LLC. (Fig 30). Partiendo de un par de fotos estereoscópicas previamente ajustadas, el menú de la aplicación nos

permite cargar en un recuadro una fotografía que correspondería con la imagen izquierda y en otro recuadro una fotografía que sería la imagen derecha. De forma automática, se crea una imagen única en la que se ha superpuesto el par de fotos previa aplicación de los filtros de colores que se explicaron con anterioridad (ver Método anáglifo en introducción). La aplicación permite realizar ajustes de paralelaje horizontal o vertical de las imágenes. Una vez creada la imagen anáglifo definitiva, se puede exportar en diferentes formatos para ser visualizada en cualquier medio con el uso de gafas anáglifo.

Nuestro método habitual de publicación en web o papel de estas fotografías se basa en presentarlas junto a otra fotografía en 2d a su lado en la que editamos letreros y señales superpuestas en las estructuras anatómicas. Esta fotografía 2d puede ser cualquiera de las dos del par estereoscópico. La ventaja de hacerlo así es que el lector o espectador dispone de la foto original con su color no alterado y puede visualizarla cómodamente sin necesidad de utilizar las gafas anáglifo consigo. Somos conscientes del inconveniente que supone el hecho de precisar las gafas anáglifo. Como es lógico, pocos lectores disponen de ellas de forma habitual salvo que les sean proporcionadas en el momento de la visualización.

5.2.2 Método de proyección en sistema polarizado.

El formato 3d polarizado es, sin duda, el que alcanza mejores condiciones de proyección. No altera los colores originales de las fotografías y su visualización prolongada es más cómoda y provoca menos fatiga que el formato anáglifo. Desde el punto de vista logístico, se trata de un método algo complejo y que precisa un coste económico

asociado. Se precisará un aparato que emita las imágenes con luz polarizada y unas gafas que filtren la luz y la hagan llegar a cada ojo.

Antes de proyectar, hemos de repasar el formato de presentación de las imágenes desde nuestro ordenador. En nuestro grupo creamos previamente una presentación de diapositivas en la que cargamos las dos imágenes del par estereoscópico. Para crear las diapositivas usamos indistintamente los programas Keynote® o Powerpoint®. La peculiaridad es que las dimensiones de las diapositivas varían respecto al tamaño estándar de presentación. De hecho, en Power Point la proporción usada es de 22 x 8,25 cms. Con estas medidas se consigue un tamaño de diapositiva que permite cargar y ajustar las dos fotografías estereoscópicas una al lado de la otra (para estandarizar colocamos la izquierda a la izquierda y la derecha en la derecha). Una vez cargadas las fotos en la diapositiva debe comprobarse si emiten una imagen correcta en 3d una vez se proyecten. Dado que los pares obtenidos no son siempre perfectos, la comprobación de estereoscopia se suele hacer en tiempo real mientras se proyecta para comprobar así si los ajustes son efectivos. En esta fase, los cambios más habituales suelen ser la necesidad de mover las fotos en sentido vertical u horizontal o la necesidad de recortar la periferia de las fotos cuando ésta sea diferente entre una y otra foto. Por otro lado, se pueden realizar las ediciones que se deseen en el sentido de añadir textos, marcas, dibujar o rellenar áreas anatómicas con colores. La regla que ha de tenerse en cuenta a la hora de editar las fotos es que todo objeto que se superponga en una de las dos fotos debe ser situado en el mismo punto en la foto complementaria.

En nuestro grupo de trabajo, utilizamos dos vías de proyección en 3d polarizado en función del sistema emisor de las imágenes:

- **Monitor 3d de polarización pasiva:** En nuestro caso, utilizamos una pantalla LG® de 48". (Fig 31) Para proyectar de este modo, sólo precisamos emitir la señal del ordenador por un cable (HDMI preferiblemente) hacia el televisor. Aplicando el modo 3d del televisor, de forma automática éste emitirá las dos imágenes (izquierda / derecha) de la diapositiva de modo que se podrán visualizar con las gafas de polarización 3d pasivas compatibles con el televisor. Existen muchos tipos de televisores que emiten en 3d, de los cuales probablemente los que emite señal de más calidad sean los activos. Sin embargo, el coste del televisor en sí y de las gafas especiales que precisan suele ser alto como para proyectar a un público numeroso.
- **Sistema de proyección polarizada pasiva con 2 proyectores:** Este sistema tiene la ventaja de que nos permite proyectar las imágenes en grandes pantallas para una número elevado de espectadores. Si bien, el sistema de proyección es algo complejo. Para sistematizar su explicación, ordenaremos sus componentes por orden desde su emisión a su visualización (Fig 32):
 1. Ordenador: en nuestro caso utilizamos un ordenador portátil Mac Book Pro de Mac Apple®. En este tendremos creada previamente una presentación en formato keynote o powerpoint con el formato de diapositivas antes mencionado.
 2. Tarjeta gráfica: en nuestro caso usamos la tarjeta Digital DualHead2Go de Matrox® que se conecta al portátil por medio de una conexión usb y otra vga. Se trata de un sistema que divide la imagen emitida por la pantalla del ordenador en dos mitades. De esta forma,

la imagen cargada en cada lado de la diapositiva se puede emitir de forma independiente una de otra.

3. **Proyectores:** Cada una de las dos mitades en las que la tarjeta gráfica divide la imagen de la pantalla del ordenador se emite desde la tarjeta gráfica a dos proyectores por medio de sendos cables DVI. Los proyectores utilizados pueden ser proyectores convencionales (no son proyectores 3d). Se recomienda utilizar dos proyectores similares de alta definición y, sobre todo, que tengan alta luminosidad (propiedad que se cuantifica en lumens). En nuestro caso utilizamos dos proyectores de 1024x768 - 4500 lumens- 4:3 de la marca Vivitek D945VX ® . Uno de los pasos más delicados de la proyección es el ajuste de los proyectores. Para conseguir una proyección adecuada sobre la pantalla es necesario que las imágenes emitidas por cada proyector se ajusten de forma exacta una sobre la otra. Para facilitar esta tarea, se utiliza una diapositiva en la que se proyectan dos dianas similares dibujadas una al lado de la otra de forma que cada proyector emite la misma imagen de esa diana. En ajuste de proyectores consiste en superponer la diana una sobre la otra de manera exacta. Normalmente se dispone de sistemas manufacturados consistentes en estructuras metálicas que permiten situar un proyector encima del otro con la capacidad de realizar ajustes precisos en la posición de cada proyector para que se produzca la cuadratura perfecta entre las dos imágenes proyectadas.

4. Filtros de polarización: la luz emitida por cada proyector debe ser polarizada por medio de filtros de cristal situados delante de proyector. Existen filtros de diferentes tipos en función de cómo modifican las ondas de luz. En nuestro caso, utilizamos filtros de polarización lineal. En esta fase se consigue que la luz emitida por el proyector que lanza la imagen del lado izquierdo de la diapositiva adquiera una longitud de onda diferente a la que emite el proyector al que llega la imagen del lado derecho. Se recomienda que los filtros se mantengan a una distancia superior a 2 cms de la lente de los proyectores para evitar que el calor que éstas emiten los queme.

5. Pantalla: Las imágenes emitidas deben ser proyectadas hacia una pantalla especial recubierta por una superficie metálica que potencia la polarización de la luz emitida por los proyectores. Estas pantallas suelen recibir el nombre de “pantallas de plata” o “Silver screen”. En nuestro caso adquirimos una pantalla fabricada en portátil con pie de 2,10 x 2,10 cms de la marca DaLite® que importamos de EEUU.

Una alternativa a las pantalla portatiles es el uso de las pantallas de los cines que emiten 3d en formato polarizado. Se trata de una alternativa que permite la proyección de las imágenes en 3d para grandes foros sin necesidad de transportar ni montar la pantalla. Si bien, para alcanzar una señal adecuada en grandes espacios como puede ser un cine, se precisan

proyectores mas potentes a los que describimos anteriormente.

6. Finalmente, la señal emitida y reflejada por las pantallas alcanza los ojos del espectador y precisa para su visualización el uso de gafas de polarización lineal. Cada ocular de la gafa tendrá un filtro que permitirá a cada ojo percibir de forma selectiva la luz emitida por el proyector correspondiente . Es decir, la imagen emitida por el proyector de la foto derecha sólo atravesará el filtro del ocular derecho de las gafas mientras que la imagen del proyector izquierdo sólo atravesará el ocular izquierdo.



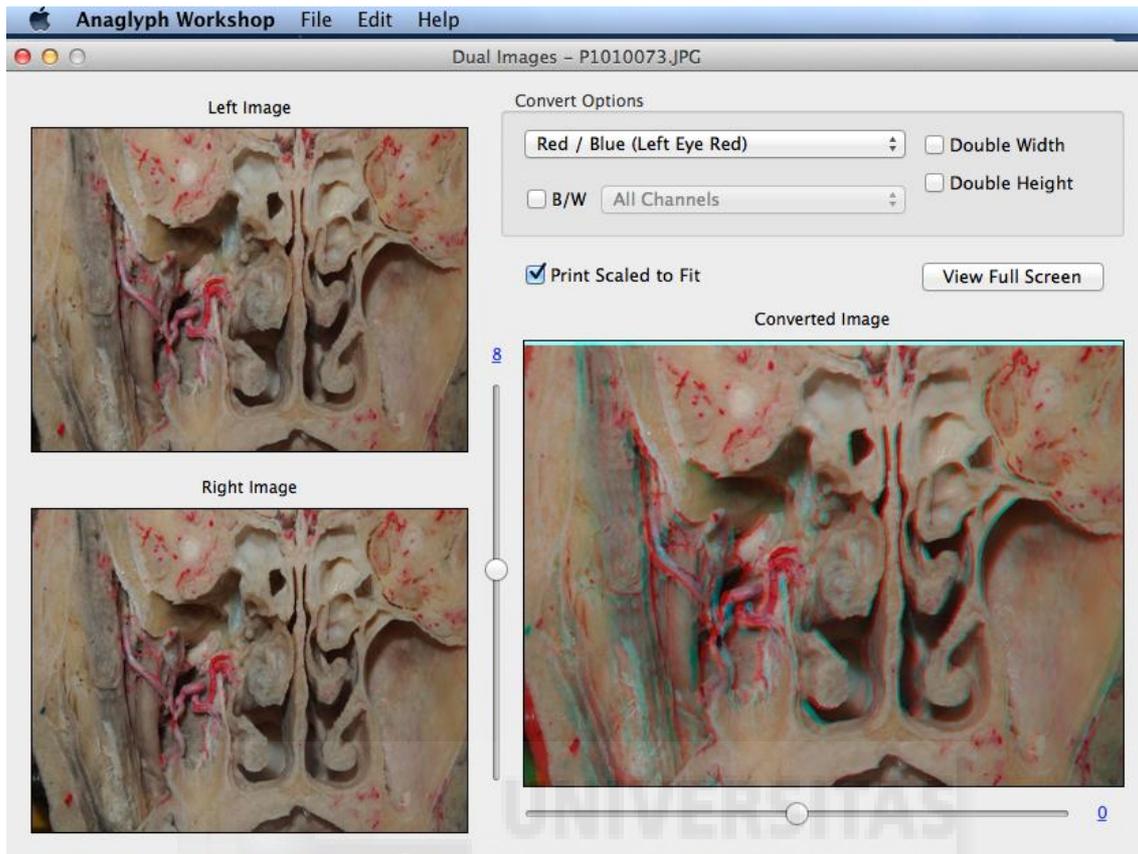


FIG 30. Proceso de edición de una fotografía en formato anáglifo.



FIG 31. Proyección 3d usando monitor 3d pasivo.

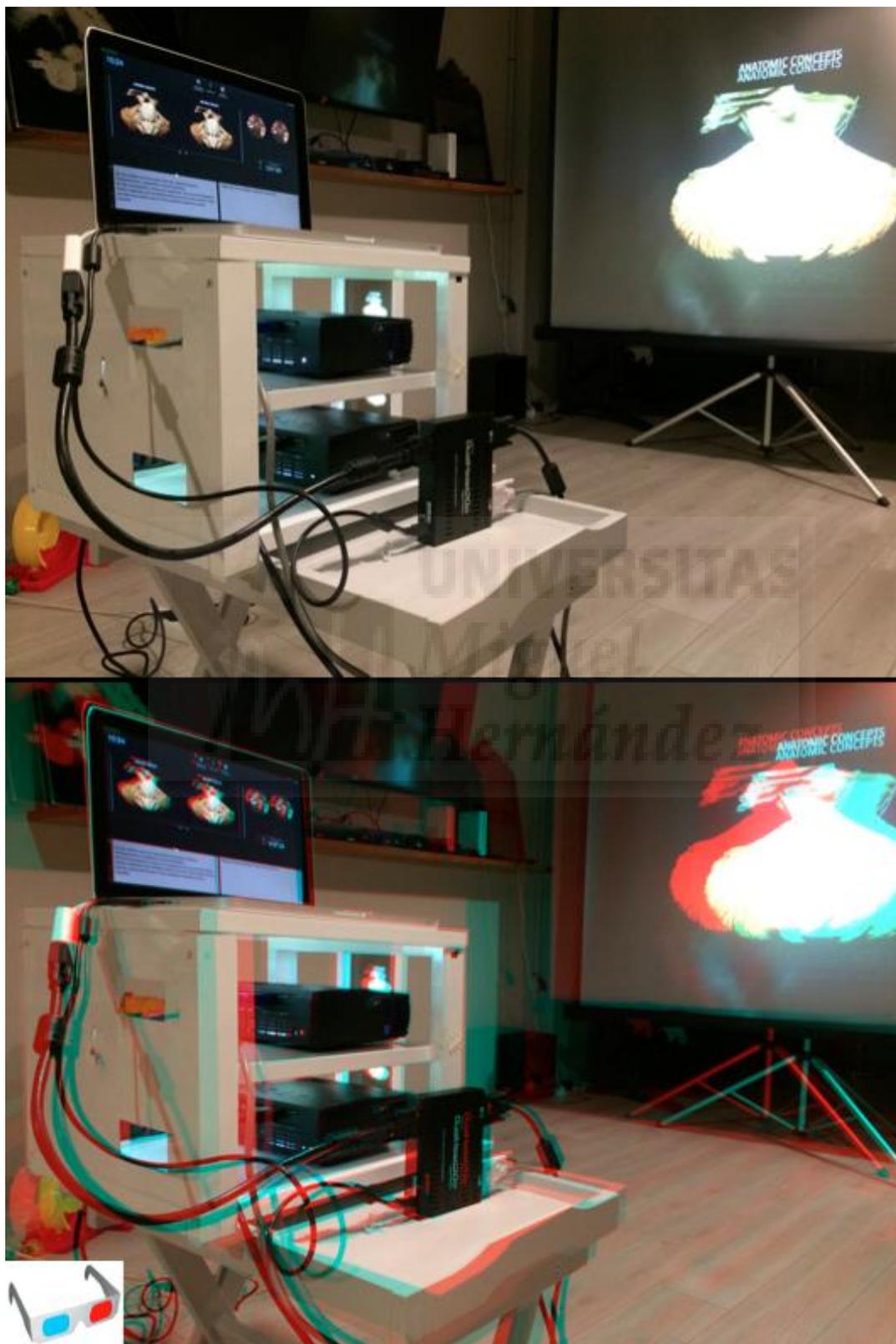


FIG 32. Montaje para la proyección de imágenes 3d

6. RESULTADOS

6.1 Material gráfico obtenido.

A continuación mostramos algunos ejemplos del material fotográfico obtenido con el método de captura estereoscópica antes descrito.

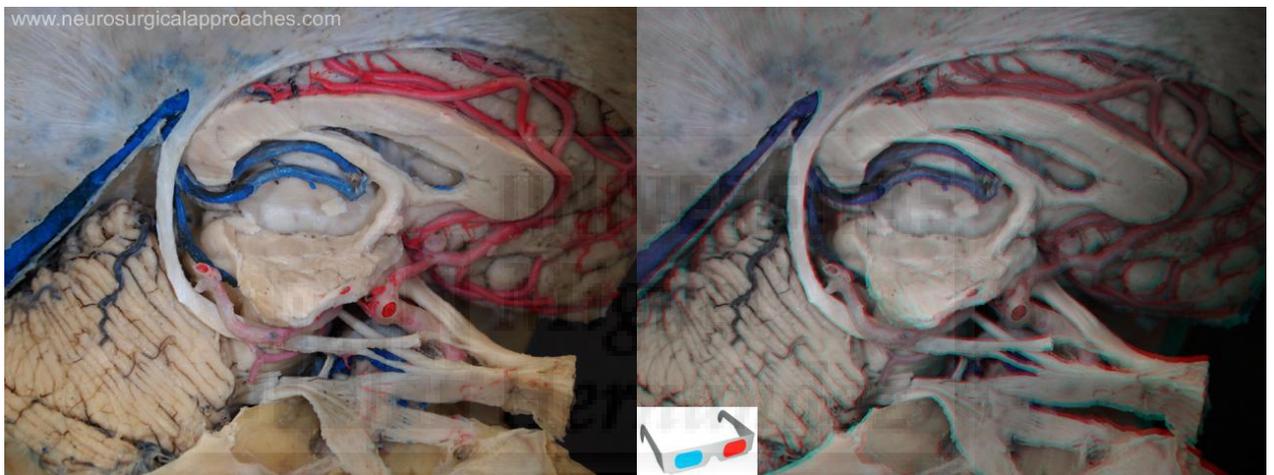


Fig 33. Ejemplo de edición de fotos anatómicas.

Cada fotografía se muestra en el formato que se puede contemplar en el ejemplo. La figura 33 ilustra el método de edición utilizado. A la izquierda se muestra una fotografía en formato 2d sobre la que se van a editar los letreros que indican las estructuras a mostrar así como gráficos relacionados con los abordajes. A la derecha se expone la misma fotografía que ha sido procesada en formato anáglifo para ser visualizada con las gafas correspondientes.

Se han fotografiado, entre otras muchas, las siguientes regiones o abordajes:

6.1.1 OSTEOLÓGIA NASAL Y DE BASE DE CRÁNEO

6.1.2 RELACIÓN DE PUNTOS CRANEOMÉTRICOS CON SUPERFICIE CEREBRAL

6.1.3 ANATOMÍA DE LA SUPERFICIE Y DE LA SUSTANCIA BLANCA CEREBRAL

6.1.4 ANATOMÍA DEL SISTEMA VENTRICULAR

6.1.5 ANATOMÍA DE LA ÓRBITA

6.1.6 ANATOMÍA DEL ABORDAJE ENDONASAL TRANSESFENOIDAL

6.1.7 ANATOMÍA QUIRÚRGICA DEL ABORDAJE LATERAL SUPRAORBITARIO

6.1.8 ANATOMÍA QUIRÚRGICA DEL ABORDAJE ANTERIOR INTERHEMISFÉRICO
TRANSCALLOSO AL SISTEMA VENTRICULAR.

6.1.9 ANATOMÍA DEL ABORDAJE RETROSIGMOIDEO AL ÁNGULO PONTOCEREBELOSO

6.1.10 ANATOMÍA DEL ABORDAJE INFRATENTORIAL SUPRACEREBELOSO A LA GLÁNDULA
PINEAL

6.1.11 ANATOMÍA QUIRÚRGICA DE LA REGIÓN SUPRASELAR Y DEL SENO CAVERNOSO

6.1.12 ANATOMÍA QUIRÚRGICA DEL RAQUIS



6.1.1 OSTEOLÓGIA NASAL Y DE BASE DE CRÁNEO

a) Preparación del espécimen

Para la realización de este capítulo se han empleado cráneos secos que han sido preparados con anterioridad por los técnicos de laboratorio de la Facultad de Medicina. Después del proceso de limpieza habitual del hueso de cualquier material blando (periostio, musculo, órganos internos) se ha llevado a cabo un proceso de separación de huesos a través de las suturas naturales. De este modo podemos mostrar de una forma didáctica la composición elemental de la base de cráneo y los huesos que lo forman. Muchas de las piezas están sometidas a un proceso final de barnizado.

b) Técnica de disección.

Al tratarse de cráneos y huesos secos sólo nos hemos limitado a colocar los huesos en las posiciones deseadas. Habitualmente usamos un fondo negro para resaltar más las piezas fotografiadas.

c) Método de fotografía estereoscópica

En este caso, al tratarse de piezas sueltas que podíamos situar con comodidad en el centro de nuestro “escenario” de fondo negro, hemos utilizado el método de fotografía basado en cámara de fotos ajustada a la barra deslizante de un trípode convencional. (Fig 22-24)

d) Ventajas del 3D

Para la comprensión de la osteología nasal y de la base del cráneo resulta de gran interés tener una correcta integración tridimensional de los relieves óseos que nos encontramos . Estamos hablando de cavidades profundas: fosas nasales , órbita, etc.. y , por lo tanto, esta percepción de profundidad se hace más necesaria de lo habitual. El efecto de dar sensación de volumen a los huesos sueltos situándolos sobre un fondo negro multiplica este efecto.



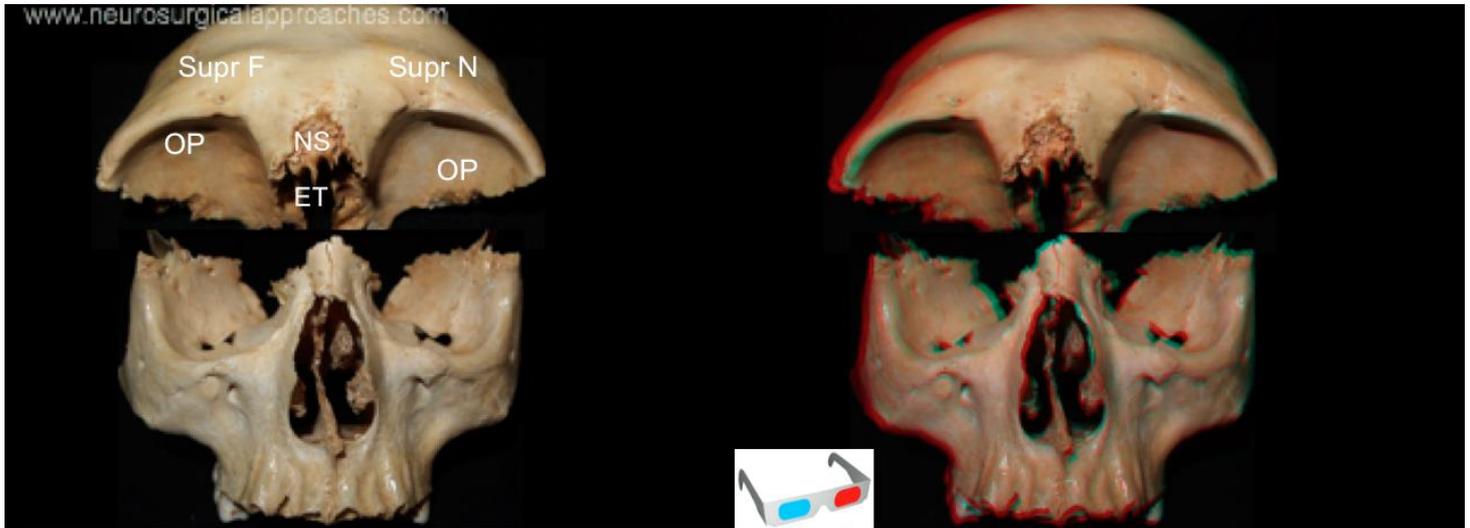


FIG 34. Articulación del hueso frontal con el conjunto de maxilar-esfenoides-etmoides-huesos nasales. *ET*: hueso etmoidal; *NS*: sutura nasal; *OP*: lámina orbitaria del hueso frontal; *Supr F*: foramen supraorbitario; *Supra N*: orificio supraorbitario.

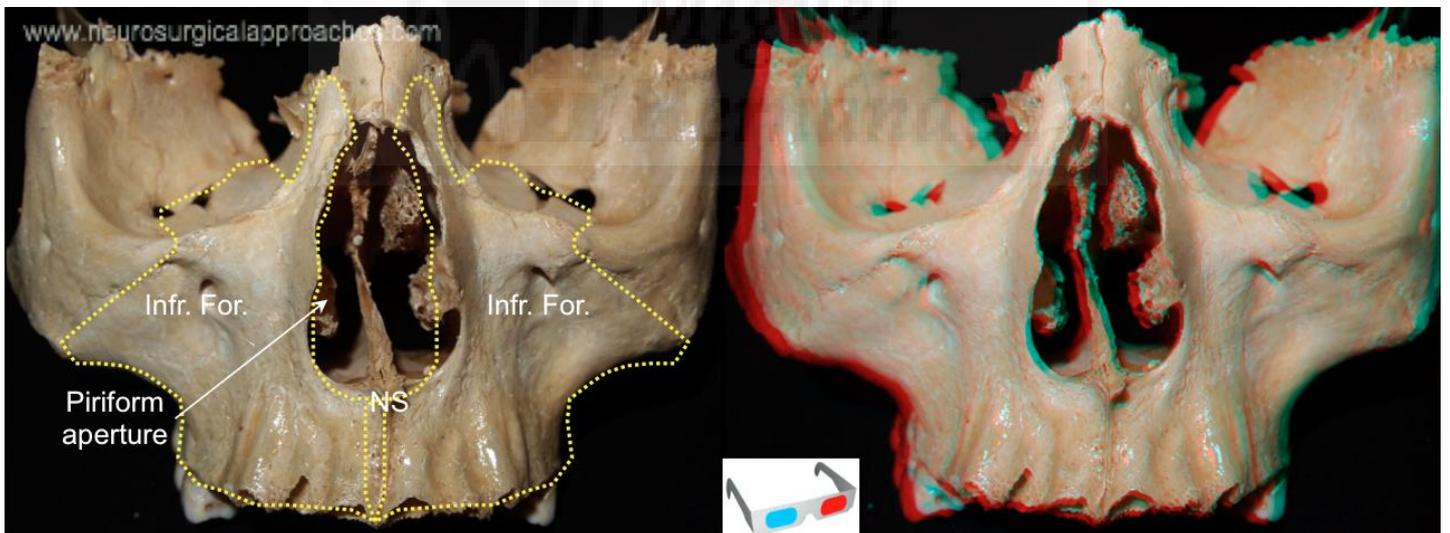


FIG 35. Vista anterior del los huesos maxilares articulados. Por encima de la fosa incisiva se aprecia el foramen infraorbitario. En la línea media la articulación de ambos maxilares delimita la apertura nasal o apertura piriforme. Cada hueso presenta un cuerpo y cuatro procesos: unos superior que es el frontal, uno lateral que es el zigomático, uno inferior que es el incisivo y otro posterior que es el palatino. *Infr. For.* : foramen infraorbitario; *NS*: espina nasal.

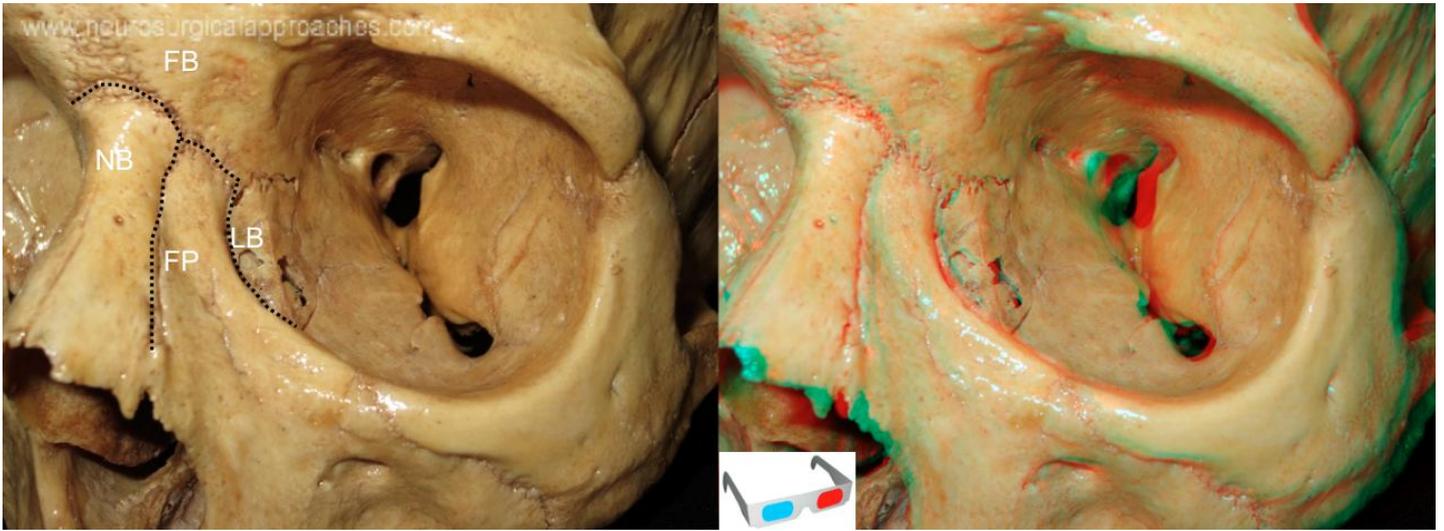


FIG 36. Región fronto-naso-orbitaria. En esta imagen vemos como el proceso frontal se articula superiormente con el hueso frontal , anteriormente con el hueso nasal y posteriormente con el hueso lacrimal. Se trata de una región de interés quirúrgico para el abordaje de la patología nasolacrimal. *FB: hueso frontal; FP: proceso frontal del maxilar; LB: hueso lacrimal; NB: hueso nasal.*

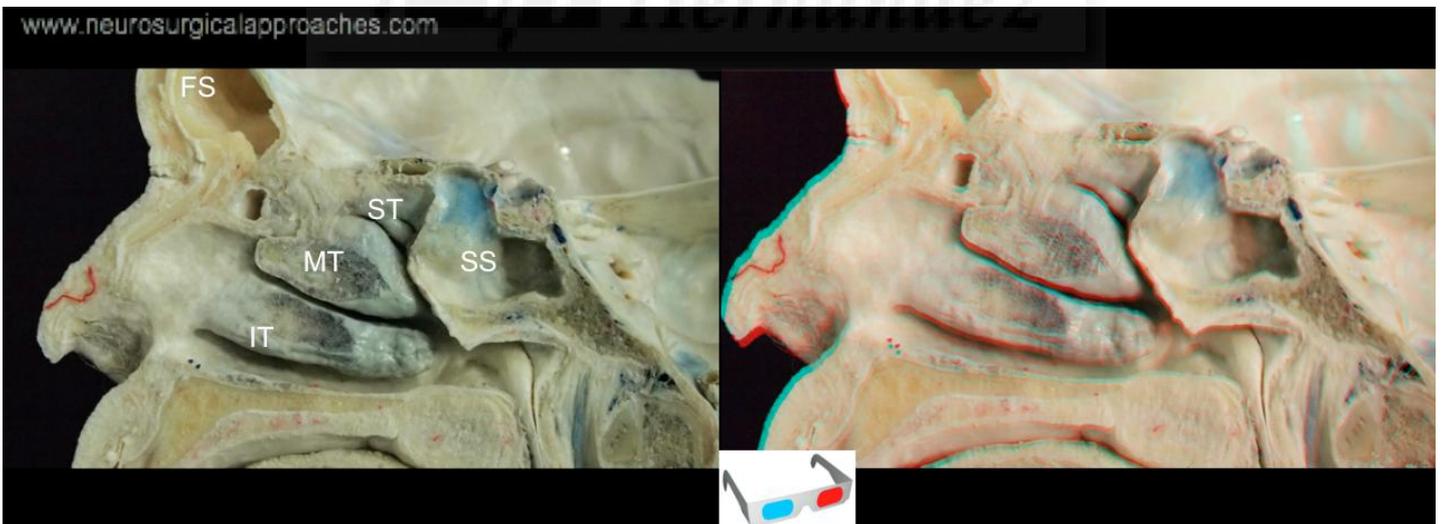


FIG 37. Corte sagital de una base de cráneo a la altura de la cavidad nasal sin el septum que nos muestra la pared lateral de las fosas nasales y el seno esfenoidal. *FS: seno frontal; IT: cornete inferior; MT: cornete medio; SS: seno esfenoidal; ST: cornete superior.*

Capítulo completo en : <http://3dneuroanatomy.com/nasal-anatomy-and-osseous-relantionships/>

6.1.2 RELACIÓN DE PUNTOS CRANEOMÉTRICOS CON SUPERFICIE CEREBRAL⁷⁵⁻⁸¹

a) Preparación del espécimen

Hemos utilizado una cabeza previamente tratada en formol sin inyección previa.

b) Técnica de disección.

Se ha llevado a cabo un proceso minucioso de resección de todos los componentes blandos de revestimiento del cráneo: piel, músculos, periostio. Después se han realizado craneotomías selectivas de modo que se han preservado las suturas craneales. Se ha resecado la duramadre y la aracnoides dejando limpia y expuesta la superficie cortical del encéfalo.

c) Método de fotografía estereoscópica

Se ha situado la pieza disecada en un “escenario” con fondo negro y se ha utilizado la cámara de fotos con el método de barra deslizante ajustada a trípode para su fotografiado en formato estereoscópico. (Fig 22-24)

d) Ventajas del 3D

El objetivo de esta disección es mostrar la relación entre diferentes referencias óseas craneales (especialmente suturas y puntos de confluencia entre ellas) y las estructuras corticales subyacentes. El uso

del 3D enfatiza mucho más la relación espacial entre ambas estructuras: encéfalo y cráneo.



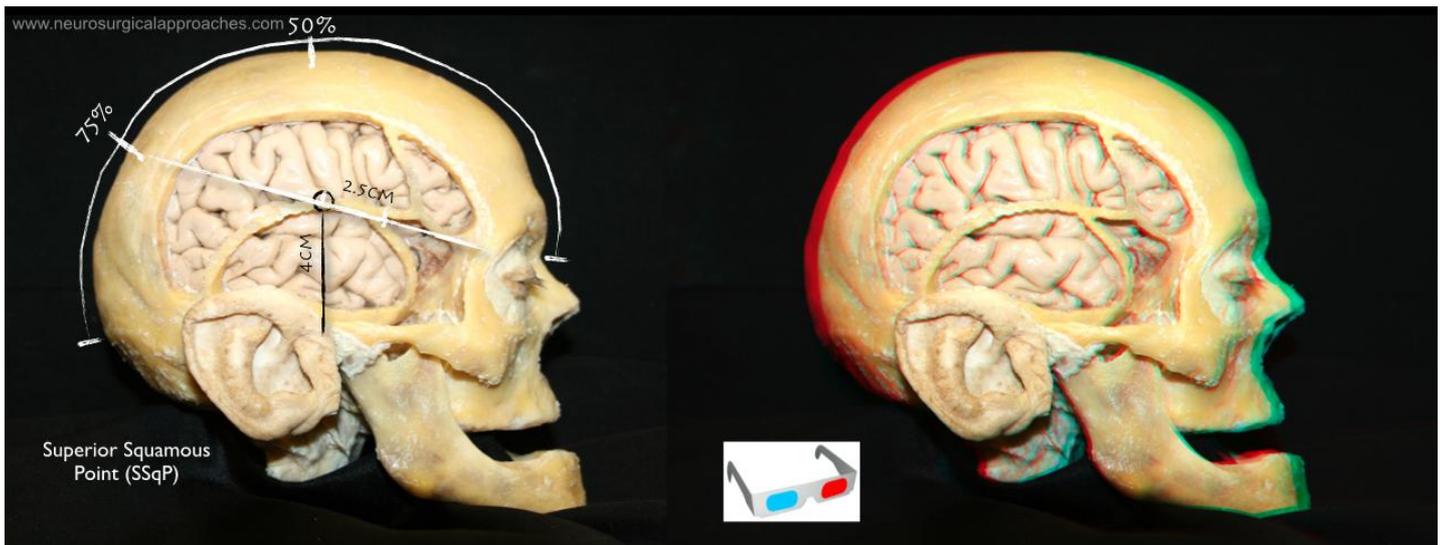


FIG 38. Visión lateral de un espécimen con el cráneo disecado manteniendo las suturas craneales a modo de referencia para orientar la anatomía cortical subyacente. El punto rolándico inferior (marcado con *circulo negro*) corresponde con con la intersección entre la cisura de Silvio y la cisura de Rolando. Marca el punto más anterior del área de Wernicke. Se encuentra en el área de intersección de la sutura escamosa con una línea vertical trazada desde la depresión preauricular localizada justo enfrente del trago. Realmente es el punto más alto del hueso temporal y se llama punto escamoso superior. Suele situarse a unos 4cm de altura y a unos 2,5 cms posterior al punto silviano anterior.

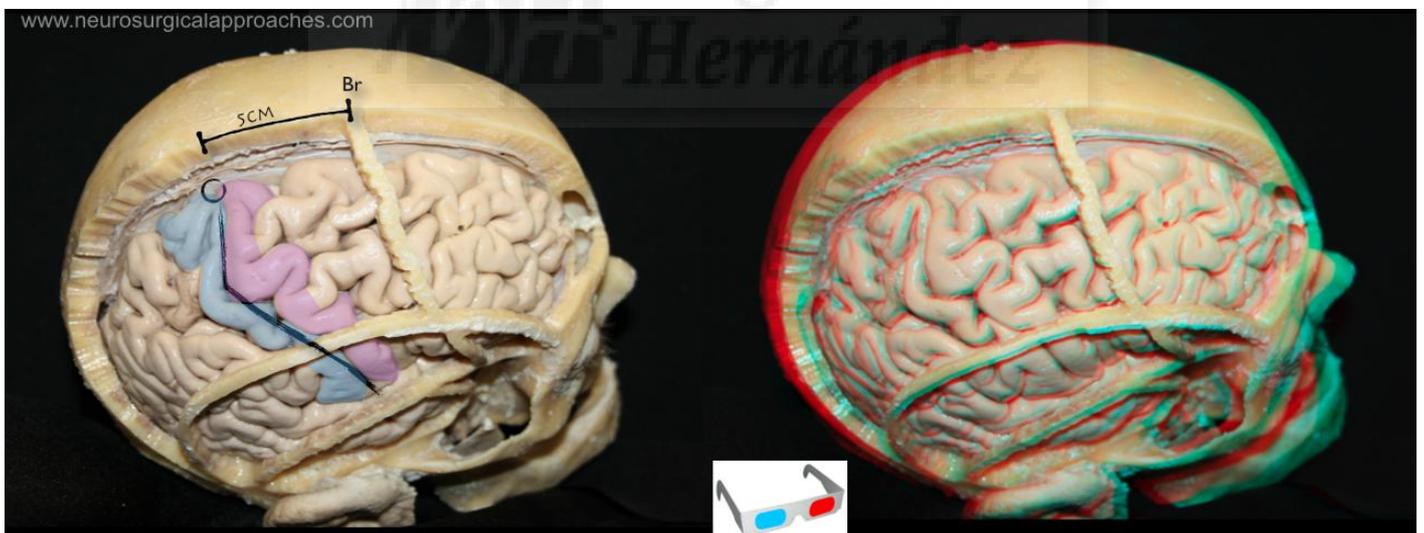


FIG 39. Un punto importante a nivel de la superficie cerebral es el *Punto Rolándico Superior* (marcado con *circulo negro*). Se trata de la intersección del surco central con la cisura interhemisférica. A nivel craneométrico se sitúa a unos 5cms posterior al bregma. El punto craneométrico situado sobre el punto rolándico superior se denomina *Punto Sagital Superior*. Es obvia la importancia de localizar este punto en cirugía ya que nos permitirá conocer la posición del surco central y , por tanto, el limite entre el giro precentral (*rosa*) y postcentral (*azul*). *Br: Bregma*.

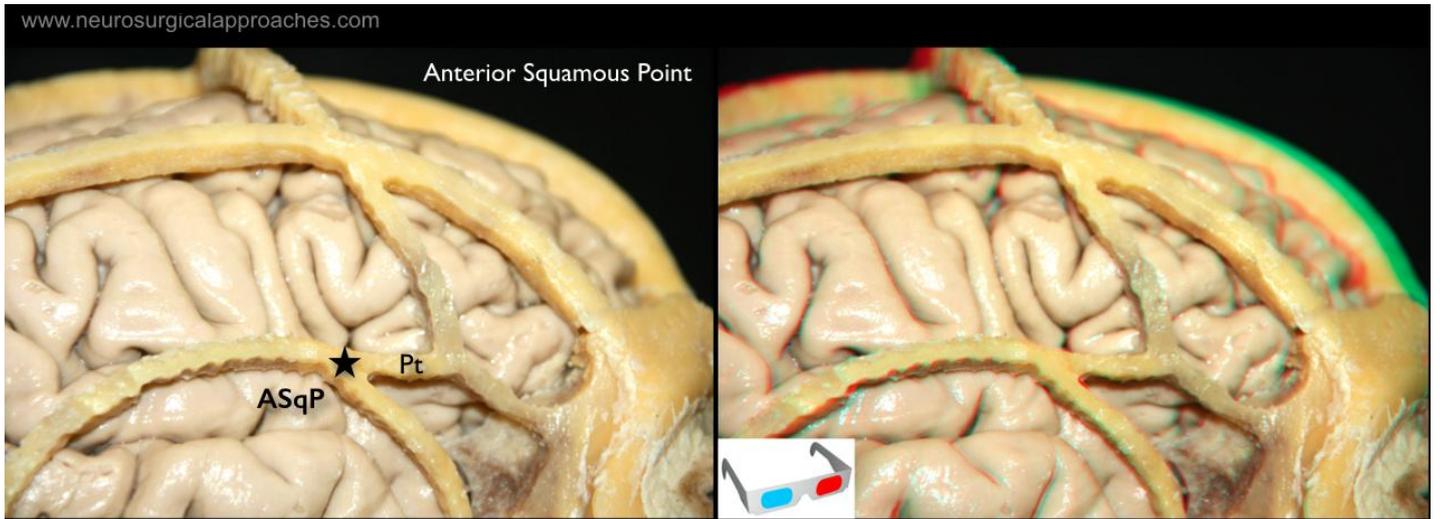


FIG 40. En esta imagen se representa el punto escamoso anterior (ASqP, representado con una *estrella*). Es el punto mas anterior de la sutura escamosa justo posterior al pterion. Este punto nos va a marcar la posición aproximada del Punto Silvano Anterior . Se trata del punto donde la cisura de Silvio se hace más amplia y se sitúa a la altura de la pars triangularis del opérculo frontal.
ASqP: punto escamoso anterior; Pt: pterion.

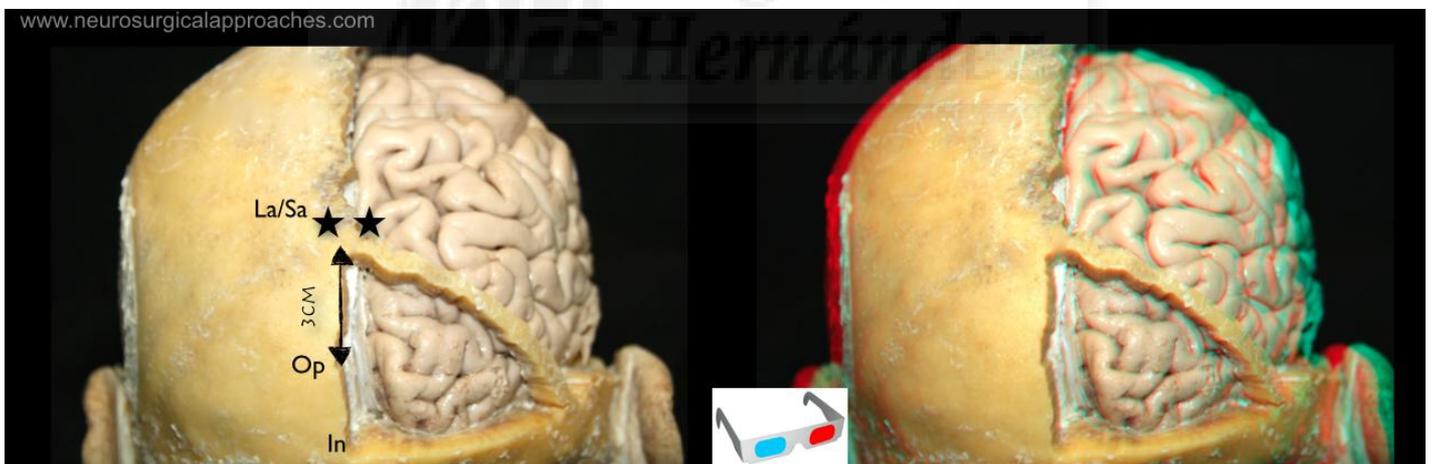


FIG 41. Aquí se representa la situación del punto craneométrico lambda (representado con doble estrella). Este es el punto de confluencia de las suturas sagital y lamboidea y bajo él encontramos el punto donde la cisura parieto-occipital desemboca en al convexidad cerebral desde su trayectoria a nivel interhemisférico. A este punto del cerebro le llamamos cisura occipital externa. Se sitúa a unos 25 cms posterior al nasion, 13 cms posterior a bregma y unos 3 cms por encima del opistocranion.
In: inion; La/Sa: punto Lambda (confluencia de suturas lamboidea y sagital); Op: opistocranion.

Capítulo completo en: <http://3dneuroanatomy.com/craniometric-points-of-the-skull-and-the-cerebral-cortical-surface/>

6.1.3 ANATOMÍA DE LA SUPERFICIE Y DE LA SUSTANCIA BLANCA CEREBRAL

a) Preparación del espécimen

En este caso los encéfalos han sido tratados con la técnica de klinger ⁷⁴. Esta técnica permite con el proceso de formolado y congelación separar las fibras y tractos que componen la sustancia blanca cerebral para así facilitar su disección.

b) Técnica de disección.

La disección ha sido realizada con la ayuda del Dr Pablo González López. Se inicia desde la superficie cortical y se realiza de forma progresiva hacia las estructuras profundas con la ayuda de una espátula de madera cuyo extremo ha sido cortado de forma que quede completamente romo y en forma semicircular. Ésta técnica requiere experiencia y gran conocimiento de la anatomía de sustancia blanca.

c) Método de fotografía estereoscópica

Las piezas han sido situadas en el centro de nuestro “escenario” de fondo negro. Para aumentar la sensación de profundidad entre estructuras hemos utilizado la iluminación de dos lámparas situadas a cada lado de la pieza para provocar así la formación de sombras en los relieves creados. La captura ha sido realizada con la cámara convencional ajustada a la barra horizontal del trípode. Dado que la distancia de la cámara a la pieza ha sido de unos 50 -60 cms aproximadamente, la distancia de deslizamiento horizontal de la

cámara sobre el trípode durante la adquisición de fotos ha sido de 2cms.

d) Ventajas del 3D

La visualización 3D enfatiza la posición relativa de estructuras corticales y profundas en el encéfalo. Es especialmente satisfactoria la combinación de efectos de profundidad que nos dan las sombras creadas por la iluminación y la propia técnica estereoscópica.



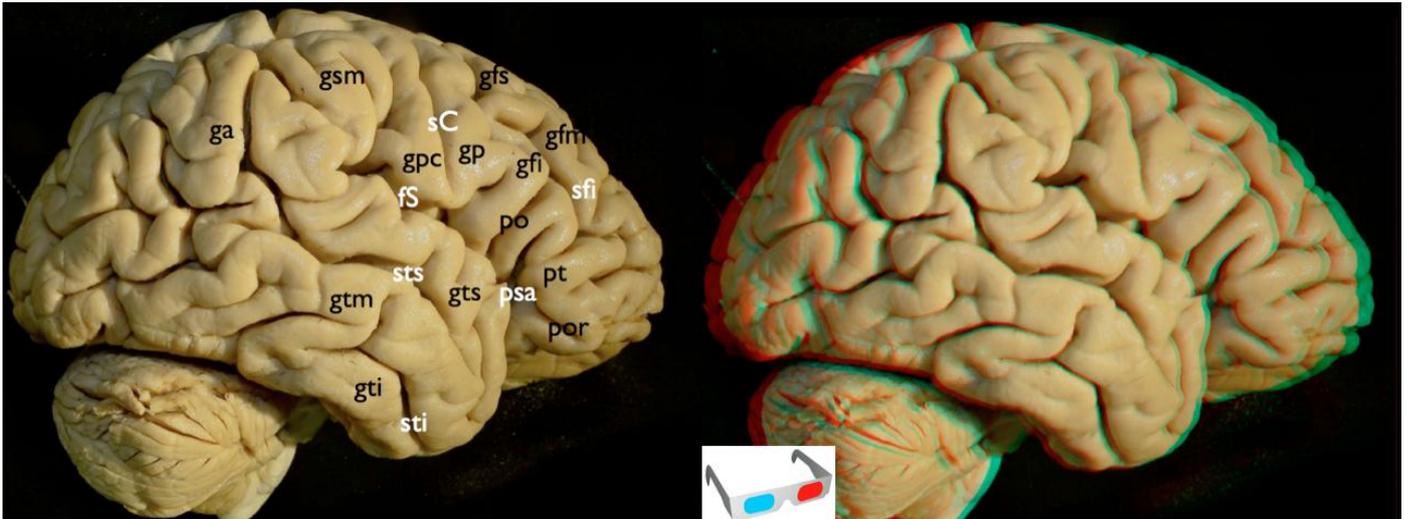


FIG 42. Se representan los surcos y giros más importantes de la superficie lateral del encéfalo. *fS*: cisura de Silvio; *ga*: giro angular; *gfi*: giro frontal inferior; *gfm*: giro frontal medio; *gfs*: giro frontal superior; *gp*: giro precentral; *gpc*: giro postcentral; *gsm*: giro supramarginal; *gti*: giro temporal inferior; *gtm*: giro temporal medio; *gts*: giro temporal superior; *po*: pars opercularis del *gfi*; *por*: pars orbitalis del *gfi*; *psa*: punto silviano anterior; *pt*: pars triangularis del *gfi*; *sC*: surco central; *sfi*: surco frontal inferior; *sti*: surco temporal inferior; *sts*: surco temporal superior.

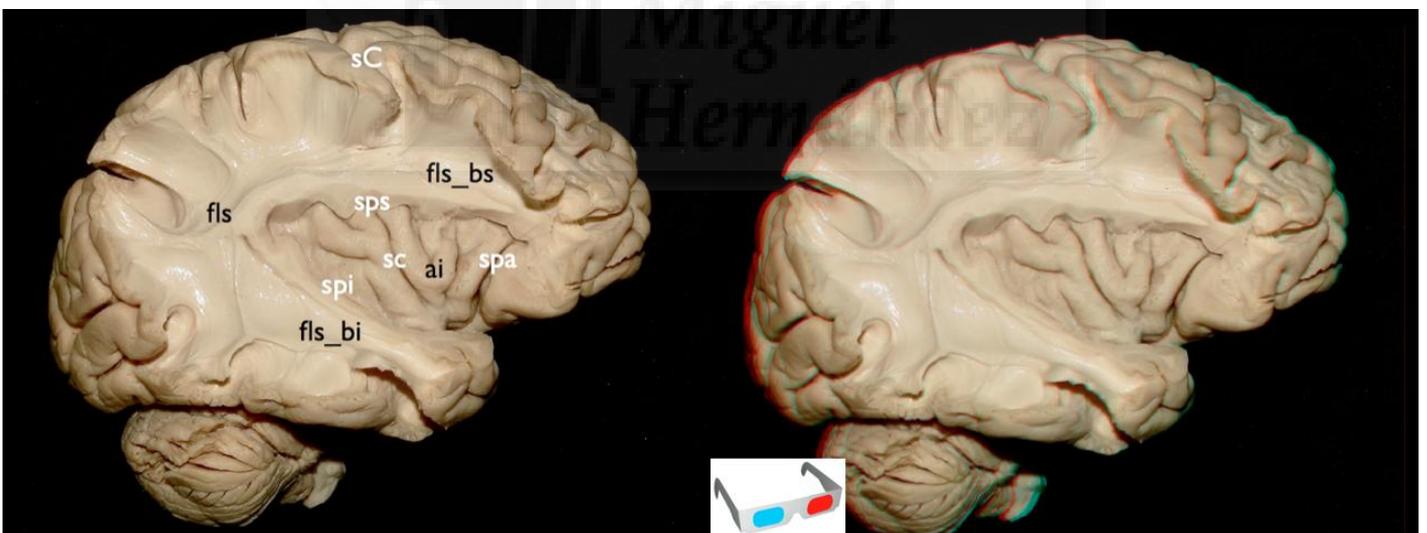


FIG 43. Tras resear cuidadosamente los opérculos frontoorbitario, frontoparietal y temporal, podemos apreciar el fascículo longitudinal superior (*fls*) en todo su esplendor alrededor del lóbulo de la ínsula en el fondo del valle silviano. La ínsula presenta una serie de características citoarquitectónicas y topográficas con importantes implicaciones quirúrgicas. *ai*: apex insular; *fls*: fascículo longitudinal superior; *fls_bi*: fascículo longitudinal superior brazo inferior; *fls_bs*: fascículo longitudinal superior brazo superior; *sC*: surco central; *sc*: surco central de la ínsula; *spa*: surco periinsular anterior; *spi*: surco periinsular inferior; *sps*: surco periinsular superior.

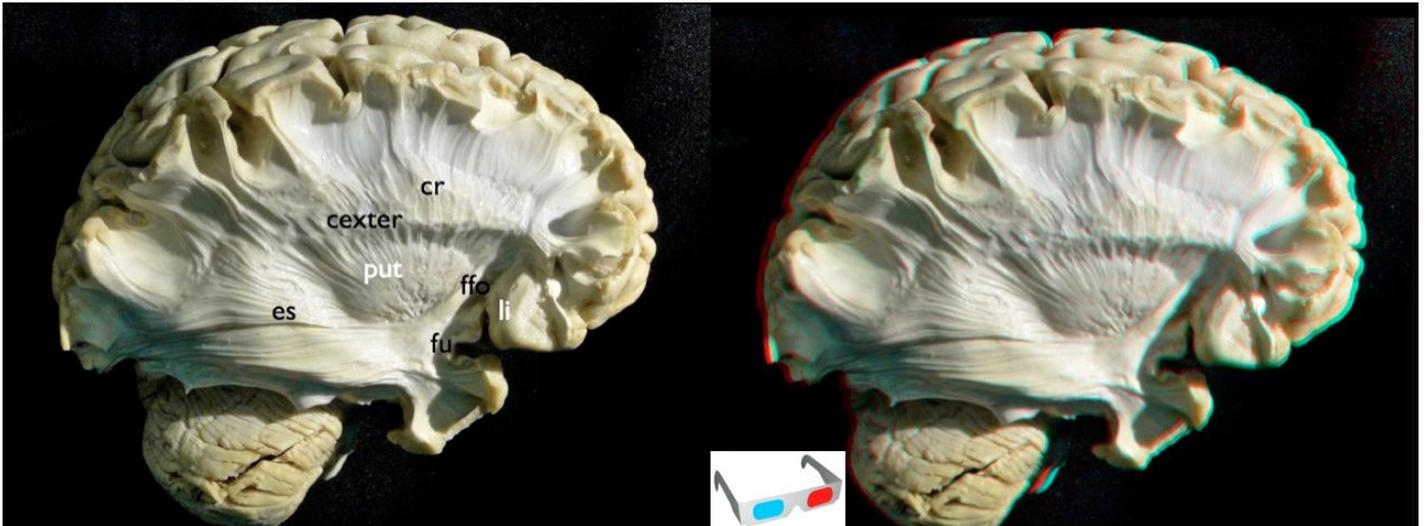


FIG 44. Tras retirar por completo la cápsula externa, así como el fascículo longitudinal superior (fls) y la parte basal y lateral de los lóbulos temporal y occipital, vemos como la cápsula externa (cexter) se incorpora justo por debajo del fls a una serie de fibras comisurales y de proyección formando la corona radiata (cr). Las fibras de proyección corresponden a la cápsula interna, mientras que las comisurales corresponden al cuerpo calloso. Además hemos resecado parcialmente la sustancia gris que cubre al limen insular, mostrando el fascículo uncinado (fu) y la total extensión de las fibras del fascículo frontooccipital (ffo). El fascículo uncinado conecta la cara mesial del polo temporal así como varios núcleos amigdalares, con la parte posterior de los giros frontoorbitarios. El fascículo occipitofrontal se une a otra serie de sistemas de fibras procedentes de la comisura anterior y de las radiaciones ópticas, formando lo que se conoce como estrato sagittal (es).
cexter: cápsula externa; cr: corona radiata; es: estrato sagittal; ffo: fascículo fronto-occipital; fu: fascículo uncinado; li: limen insulae; put: putamen.



FIG 45. Disección del troncoencefalo y la unión mesencefalo-diencefálica. Vista latero-ventral izquierda.
cc: cuerpo calloso; cgl: cuerpo geniculado lateral; es: esplenio del cuerpo calloso; flo: flóculo cerebeloso; fo: fornix; nc: nucleo caudado; p: pineal; pb: pares craneales bajos; pc: pedúnculo cerebral; pir: pirámide bulbar; pro: protuberancia; ol: oliva bulbar; spc: superficie petrosa del cerebelo; stc: superficie tentorial del cerebelo; tal: tálamo; tg: tegmentum mesencefálico; ver: vermis; IIIv: tercer ventrículo; Vpc: quinto par craneal; VIpc: sexto par craneal.

6.1.4 ANATOMÍA DEL SISTEMA VENTRICULAR⁸²⁻⁸⁴***a) Preparación del espécimen***

En estas disecciones el encéfalo ha sido extraído de un espécimen formolado.

b) Técnica de disección.

El encéfalo ha sido extraído de una cabeza que hemos previamente descalotado. El proceso de extracción del encéfalo se realiza liberando éste de su anclaje al cráneo tanto a nivel dural como a nivel vasculo-nervioso. En concreto requiere la cuidadosa sección de las carótidas a nivel supraclinoideo y de los pares craneales proximos a su salida de la base del cráneo por sus respectivos agujeros. En esta disección hemos tratado de mostrar la anatomía a través de cortes axiales , sagitales y coronales. Para ello utilizamos un cuchillo largo y afilado que nos ha permitido realizar dichas secciones en los puntos anatómicos que hemos seleccionado. El procesado del encéfalo en formol facilita que el encéfalo mantenga la dureza suficiente para ser cortada sin perder integridad.

c) Método de fotografía estereoscópica

Basándonos en el método convencional de colocar la cámara sobre el trípode, en este caso hemos usado el objetivo macro y el flash led a modo de antenas para capturar detalles cercanos (fig 47-49)

d) Ventajas del 3D

El sistema ventricular esta formado por cavidades a las que se accede por abordajes que atraviesan cisuras o áreas profundas de la sustancia cerebral. Por lo tanto, la percepción estereoscópica para su mejor comprensión.



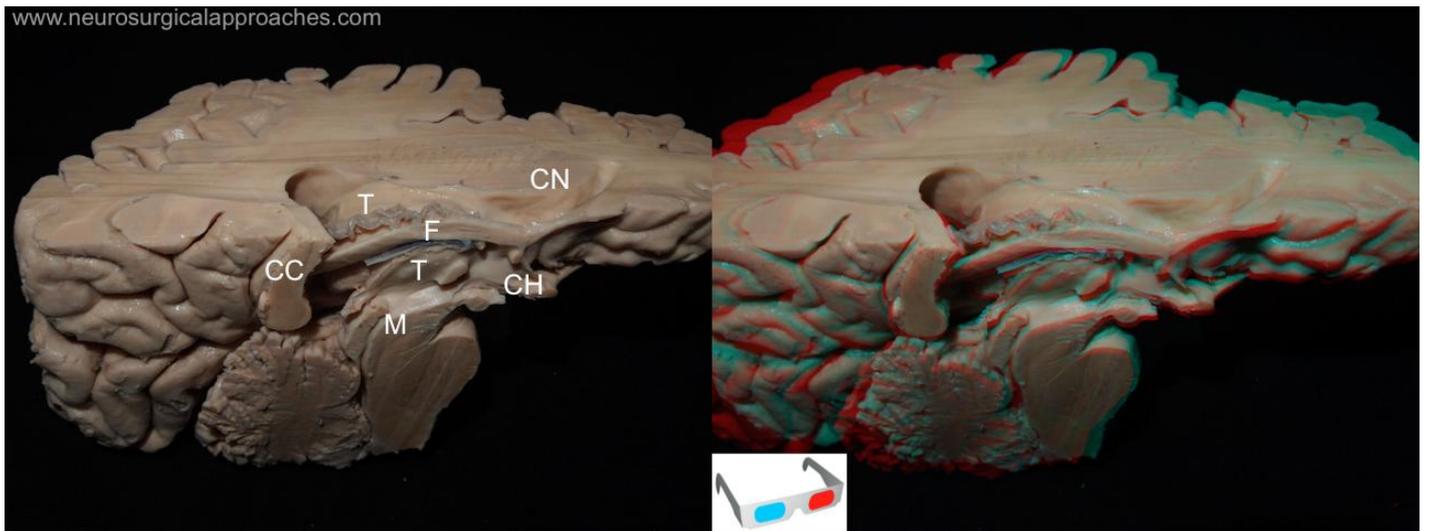


FIG 46. Sección axial y sagital del encéfalo a nivel del foramen de Monro (axial) y línea media (sagital).
 CC: cuerpo calloso; CH: quiasma; CN: núcleo caudado; F: fornix; M: mesencéfalo; T: tálamo.

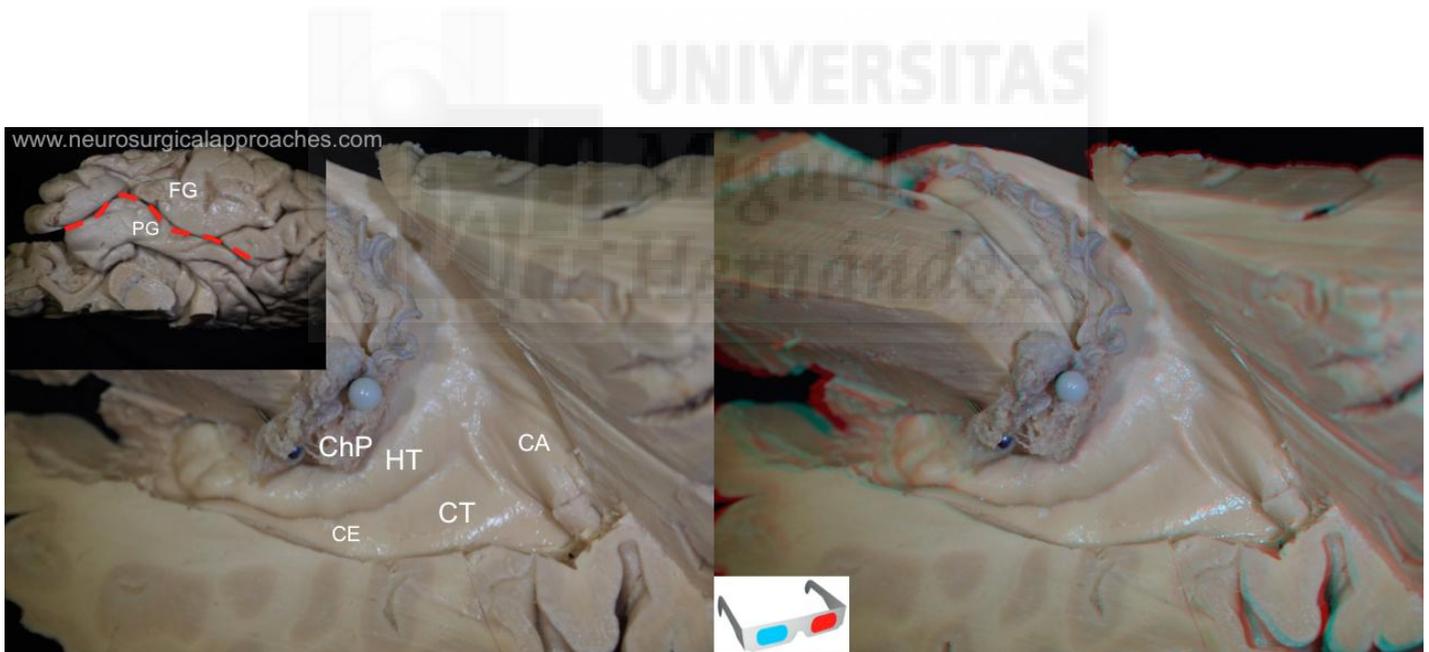


FIG 47. Esta es una imagen del atrio ventricular donde se eleva el plexo coroideo (ChP) y se aprecia: El Calcar avis (CA) en pared medial inferior que representa la proyección intraventricular de la cisura calcarina, el trigono colateral (CT) en el suelo del atrio ventricular y que representa la proyección intraventricular del surco colateral (línea roja discontinua) se proyecta hacia delante en el asta temporal como eminencia colateral (CE)) y en la pared anterior del atrio vemos como se aprecia la cola del hipocampo (HT). En la imagen de arriba a la izquierda se ve el recorrido del surco colateral (línea roja discontinua) separando el giro parahipocampal (PG) del giro fusiforme (FG).
 CA: calcar avis; CE: eminencia colateral; ChP: plexo coroideo; CT: trigono colateral; FG: giro fusiforme; HT: Cola del hipocampo; PG: giro parahipocampal.

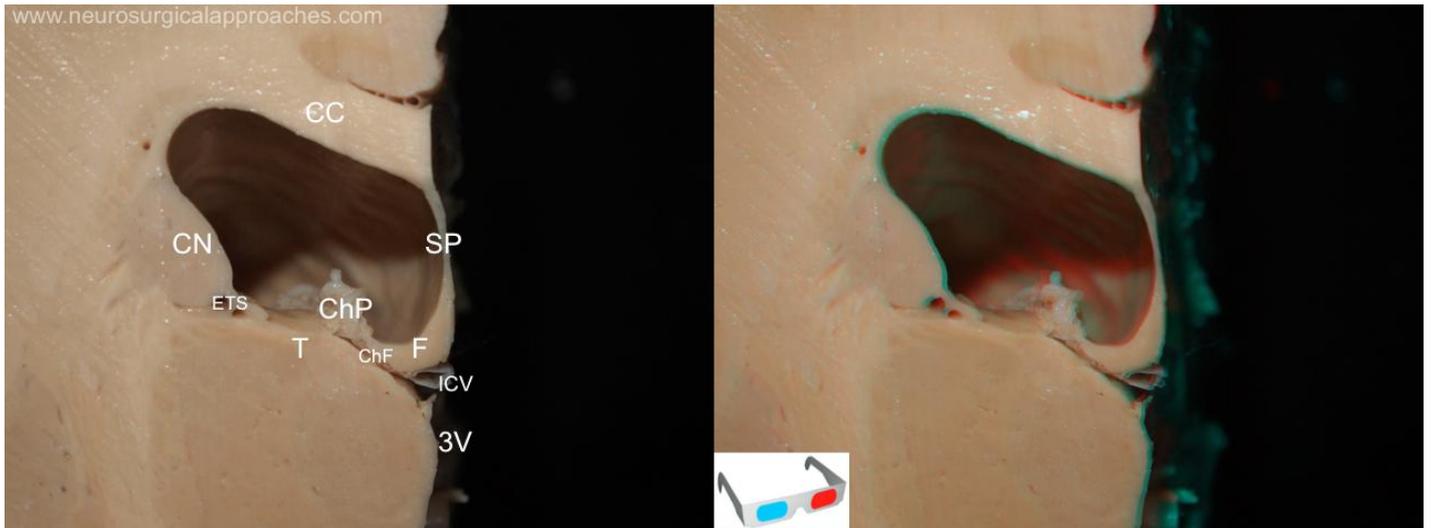


FIG 48. Corte coronal de un encéfalo a la altura del foramen de Monro. Se aprecia la transición del ventrículo lateral al tercer ventrículo. En su descripción sistemática se diferencian:
 Techo: *Cuerpo del cuerpo calloso (CC)*.
 Pared lateral: *nucleo caudado (CN)*
 Pared medial: *septum pellucidum (SP)* superior y *cuerpo del fornix (F)* inferior.
 Suelo: de medial a lateral... *fornix (F)*, *fisura coroidea (ChF)*, *plexo coroideo (ChP)*, *tálamo (T)* y *surco estriotalámico (ETS)*. La fisura coroidea es la vía anatómica que conecta el ventrículo lateral con el tercer ventrículo (3V). En el techo del tercer ventrículo encontramos las *venas cerebrales internas (ICV)*.

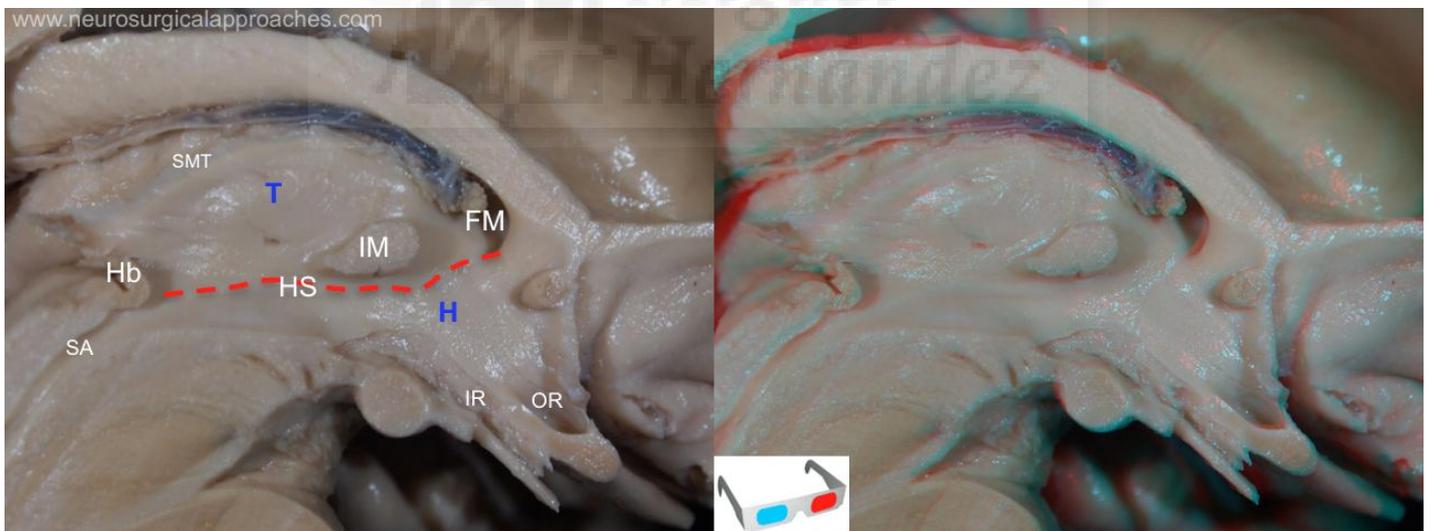


FIG 49. Imagen sagital de la pared lateral del tercer ventrículo. Se divide en 2 mitades por el surco hipotalámico (HS- línea roja discontinua): la anteroinferior o Hipotalámica y la posterosuperior o talámica.
FM: foramen de Monro; H: hipotálamo; Hb: habénula; HS: surco hipotalámico; IM: masa intertalámica; IR: receso infundibular; OR: receso óptico; SA: acueducto de Silvio; SMT: estría medular talámica; T: tálamo.

Capítulo completo en : <http://3dneuroanatomy.com/ventricular-system-topographic-and-endoscopic/>

6.1.5 ANATOMÍA DE LA ÓRBITA⁸⁵⁻⁸⁹***a) Preparación del espécimen***

Salvo las imágenes de osteología, la disección se ha llevado a cabo sobre un espécimen de formol y con previa inyección de látex rojo en arterias y azul en venas.

b) Técnica de disección.

Para la parte intracraneal se ha llevado a cabo un “peeling” del seno cavernoso con extirpación de la duramadre de este y fresado completo de las alas menores del esfenoides. De este modo se ha aislado el contenido vásculo-nervioso del seno cavernoso y su proyección anterior hacia la órbita a través del canal óptico y la fisura orbitaria superior.

Para mostrar la anatomía puramente orbitaria se ha extirpado por completo la periórbita y se ha extraído la grasa intraorbitaria dejando sólo estructuras vasculo-nerviosas y musculares. Todo ello se ha realizado con minuciosa técnica microquirúrgica.

c) Método de fotografía estereoscópica

Dada la dificultad para trasladar nuestro espécimen al escenario de fotografía, en este caso hicimos uso de nuestro sistema manufacturado de barra horizontal deslizante (Fig 17). De este modo pudimos acercar la cámara a la disección en los ángulos que se requerían. Se ha utilizado el sistema de iluminación LED con antenas y el objetivo macro.

d) Ventajas del 3D

La estructura cónica y profunda de la órbita y su complejo contenido vasculo-nervioso hacen que el aprendizaje de la anatomía de esta región se beneficie de modo especial de la estereoscopia.



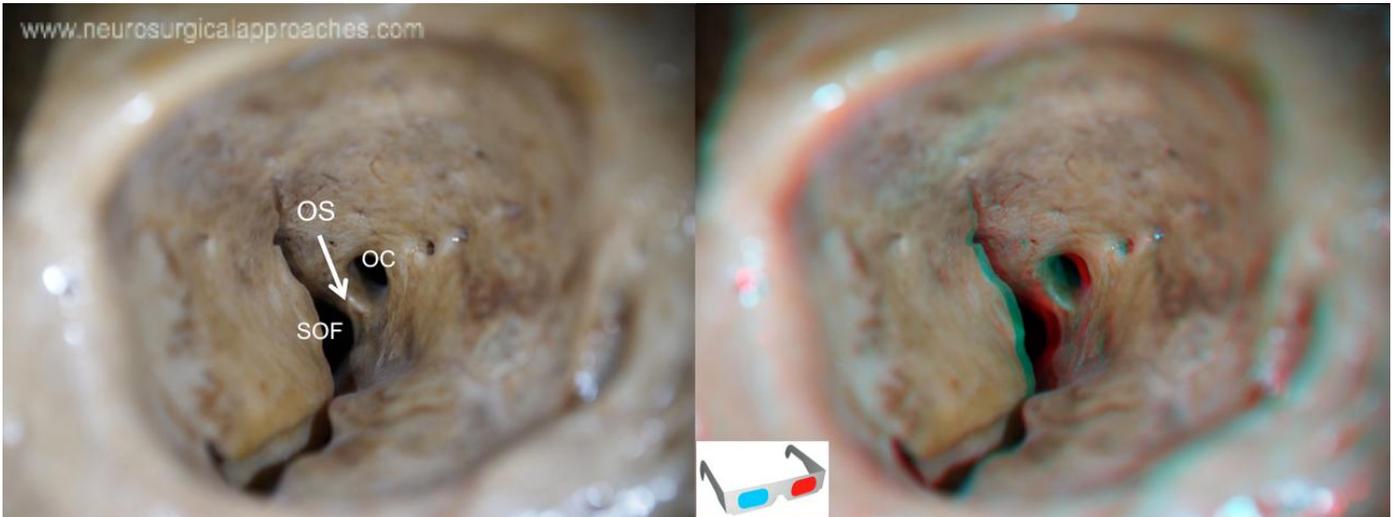


FIG 50. Referencias óseas a nivel del cono orbitario. Se aprecia la forma cónica de la órbita. OC: canal óptico; OS: pilar óptico u "optic strut"; SOF: fisura orbitaria superior.



FIG 51. Se representa la trayectoria de los nervios craneales desde su posición intracraneal a nivel de la cisterna supraselar o seno cavernoso hasta introducirse a nivel de la órbita. El círculo amarillo representa el anillo tendinoso común o anillo de Zinn y en rojo el anillo oculomotor (subdivisión dentro del anillo de Zinn).
Dentro del anillo de Zinn: II, III, NC (n.nasociliar), VI. Fuera del anillo: V1, V2 y IV.

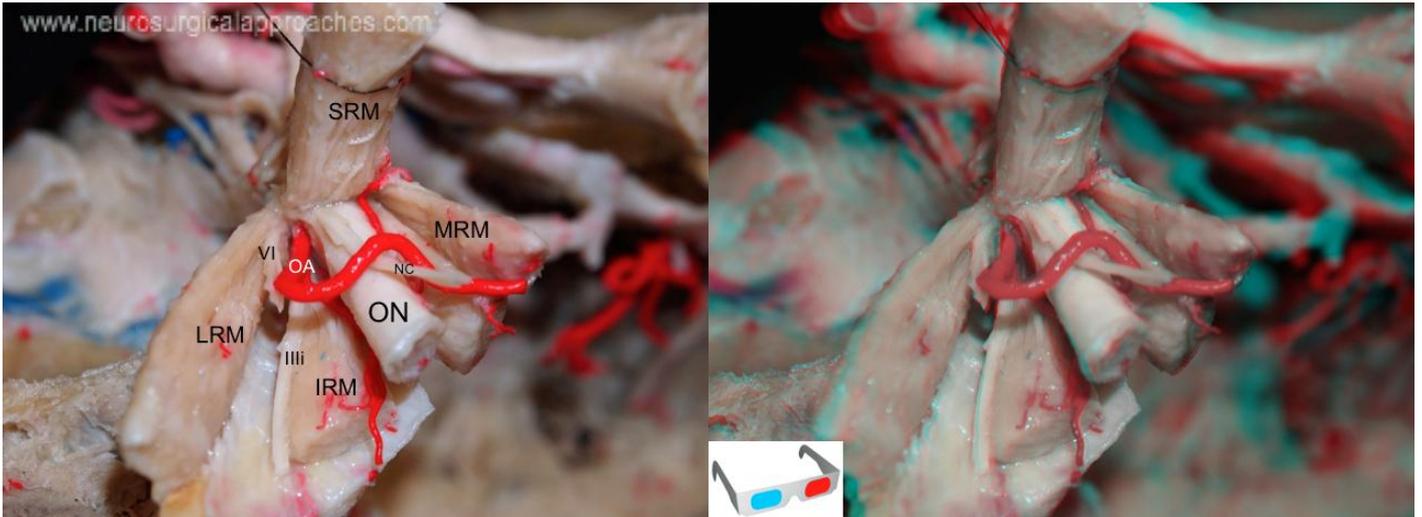


FIG 52. Anatomía del contenido vascular, nervioso y muscular de la órbita. Se muestra la disección de un órbita derecha desde visión antero-posterior. La arteria oftálmica (OA) y el nervio nasociliar (NC) entran a la órbita laterales al nervio óptico (NO) cruzándose por encima y medial a éste. El sexto par (VI) entra por la cara medial del musculo recto lateral (LRM). La división interior del tercer par craneal (IIIi) va junto al musculo recto inferior.

IRM: músculo recto inferior; LRM: músculo recto lateral; MRM: músculo recto medial; NC: nervio nasociliar; OA: arteria oftálmica; ON: nervio óptico; SRM: músculo recto superior; IIIi: tercer par craneal (división inferior); VI: sexto par .



FIG 53. Se expone una visión superolateral de la órbita disecada previamente. Aparecen las ramas más importantes de la arteria oftálmica (OA):

RMA: arteria recurrente meníngea; CILA: arteria ciliar; C.R.A: arteria central de la retina; EA: arterias etmoidales anterior y posterior. NO: nervio óptico; nc: nervio nasociliar.

Capítulo completo en: <http://3dneuroanatomy.com/anatomy-of-the-orbit/>

6.1.6 ANATOMÍA DEL ABORDAJE ENDONASAL TRANSESFENOIDAL

a) Preparación del espécimen

Para mostrar la anatomía nasal solemos usar especímenes preservados en Thiel ⁷³. (Fig 54). Sin embargo, para mostrar la anatomía mas allá del esfenoides, cuando mostramos el plano dural e intradural usamos los cadáveres en formol inyectados en látex coloreado.

b) Técnica de disección.

Hemos realizado una disección nasal simulando el abordaje transesfenoidal: resección del cornete medio derecho, resección de la parte posterior del tabique, extirpación de la pared anterior del cuerpo esfenoidal (fase que denominamos esfenoidotomía), resección de tabiques intraesfenoidales, fresado de región selar y paraselar y finalmente la resección de la duramadre que recubre ambas regiones. Tras la resección dural exponemos la glándula hipofisaria en el centro, los senos cavernosos a ambos lados con ambas arterias carótidas en su paso por el seno cavernoso hacia su segmento intracraneal y el contenido de la cisterna supraselar tras la apertura del tubérculo selar. La disección ha sido llevada a cabo mediante dos técnicas simultaneas. Por un lado la técnica endoscópica que nos permite simular las habilidades necesarias para lleva a cabo el abordaje. Por otro lado hemos realizado parte de la disección (fase intraesfenoidal) mediante disección abierta. Para ello hemos realizado un corte coronal a una cabeza formolada a la altura de los senos maxilares. A partir de ese corte con el cual eliminamos la mayor parte de la anatomía nasal

hemos realizado una disección con técnica microquirúrgica de la región intraesfenoidal incluyendo la entrada a estructuras intradurales. La ventaja que nos ha dado esta maniobra ha sido principalmente que, al eliminar la nariz como elemento de túnel que nos obligaba a adquirir las fotos con endoscopio, hemos tenido un campo suficientemente amplio para utilizar la cámara convencional a la hora de capturar las fotografías 3D.

c) Método de fotografía estereoscópica

Hemos considerado principalmente dos métodos de captura fotográfica en este capítulo.

El método endoscópico ha sido utilizado principalmente en la fase endonasal (Fig 54). Como ya explicamos en Material y métodos, se trata de un método complejo y que requiere combinar varios pares de fotos hasta conseguir un efecto 3D aceptable.

Sin embargo, la parte que se ha disecado a partir del corte coronal practicado a la cabeza se ha podido fotografiar en formato estereoscópico con la técnica ya conocida a través de una cámara convencional adaptada a la barra horizontal de propio diseño con ayuda de las antenas de luz LED.

d) Ventajas del 3D

Si existe una anatomía quirúrgica que se beneficia de su aprendizaje en 3D esta es la anatomía del abordaje endonasal⁷¹. Al tratarse de un abordaje profundo en la base del cráneo, las estructuras se disponen ante el cirujano guardando una distancia bastante fija unas de otras. Si bien, resulta paradójico que esta técnica de fotografía trate de enseñar

la anatomía del abordaje en 3d y , sin embargo, el cirujano lo realice en el quirófano con un endoscopio 2D (salvo la excepción de los nuevos endoscopios 3D que se están desarrollando).



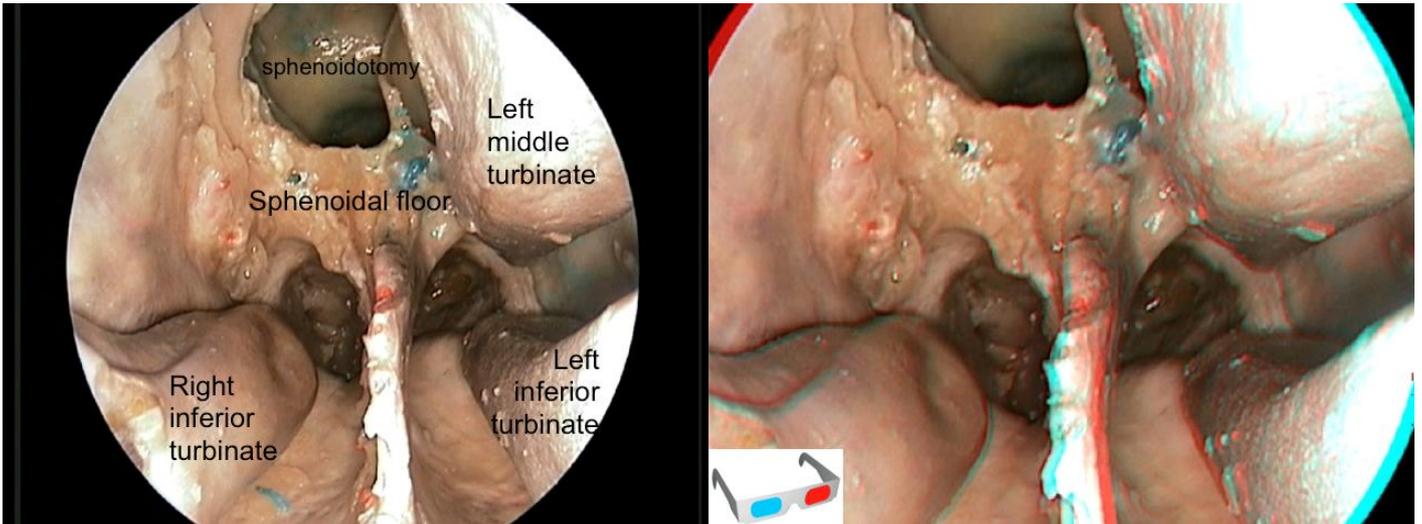


FIG 54. Imagen de la cavidad nasal posterior durante un abordaje transesfenoidal. Se ha extirpado el cornete medio derecho, la parte posterior del tabique nasal y la pared anterior del cuerpo esfenoidal (sphenoidotomy). Estas maniobras permiten que se puedan utilizar instrumentos introducidos por ambas fosas nasales.

Sphenoidotomy: esfenoideotomía o resección de la pared anterior del seno esfenoidal; sphenoidal floor: suelo esfenoidal; Left middle turbinate: cornete medio izquierdo; Right inferior turbinate: cornete inferior derecho; Left inferior turbinate: cornete inferior izquierdo.

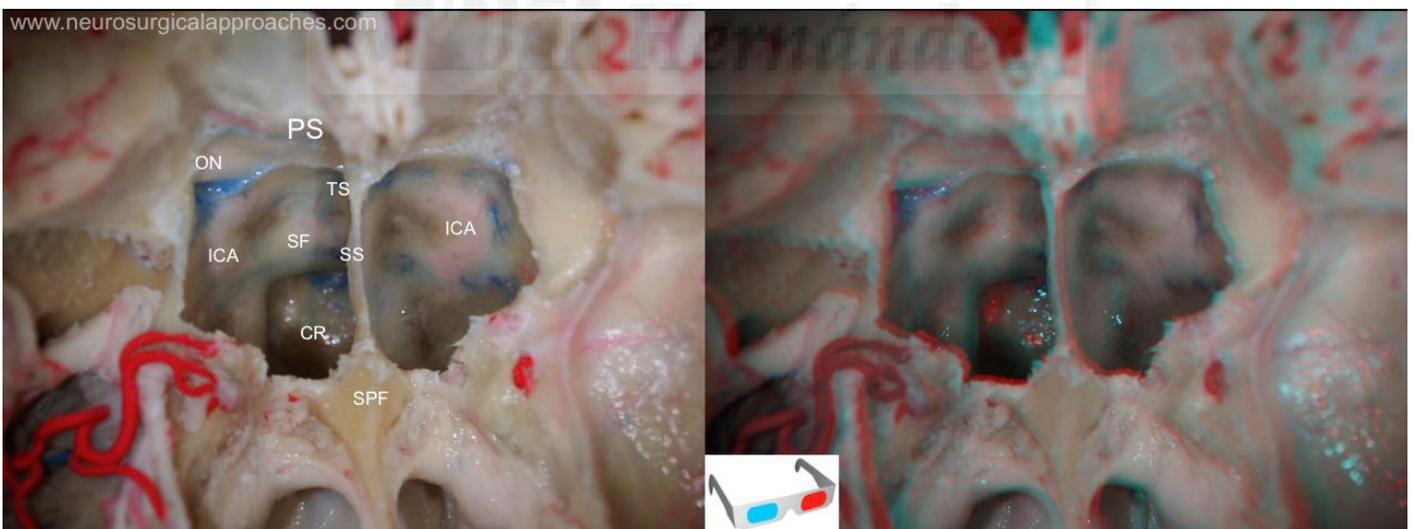


FIG 55. Fotografía con cámara convencional de un espécimen en el que se expone el interior del seno esfenoidal tras realizar una amplia esfenoideotomía.

CR: receso clival; ICA: arteria carótida interna; ON: nervio óptico; PS: planum esfenoidal; SF: suelo selar; SPF: suelo del esfenoides; SS: tabique esfenoidal; TS: tubérculo selar.

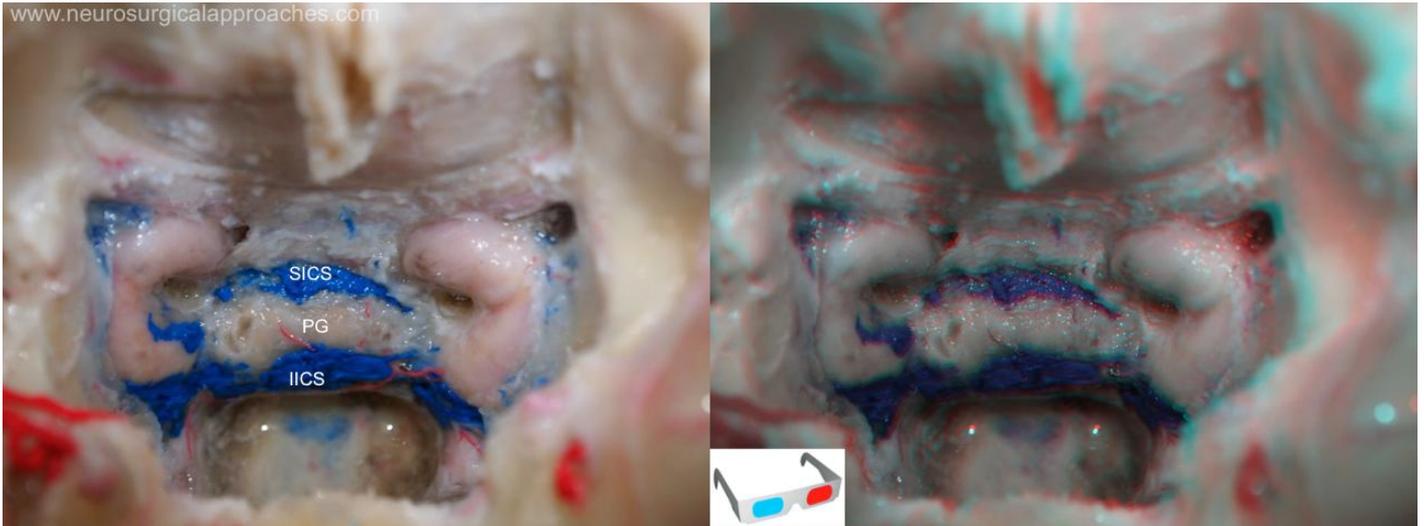


FIG 56. Imagen del interior del seno esfenoidal en la que se retira la superficie ósea que cubre la silla turca y ambos senos cavernosos así como la capa perióstica dural. Se exponen los senos intercavernosos superior (SICS) e inferior (IICS) formando junto a ambos senos cavernosos la imagen cuadrangular conocida como los “Four blues”.

IICS: seno intercavernoso inferior; PG: glándula pituitaria o hipofisaria; SICS: seno intercavernoso superior.

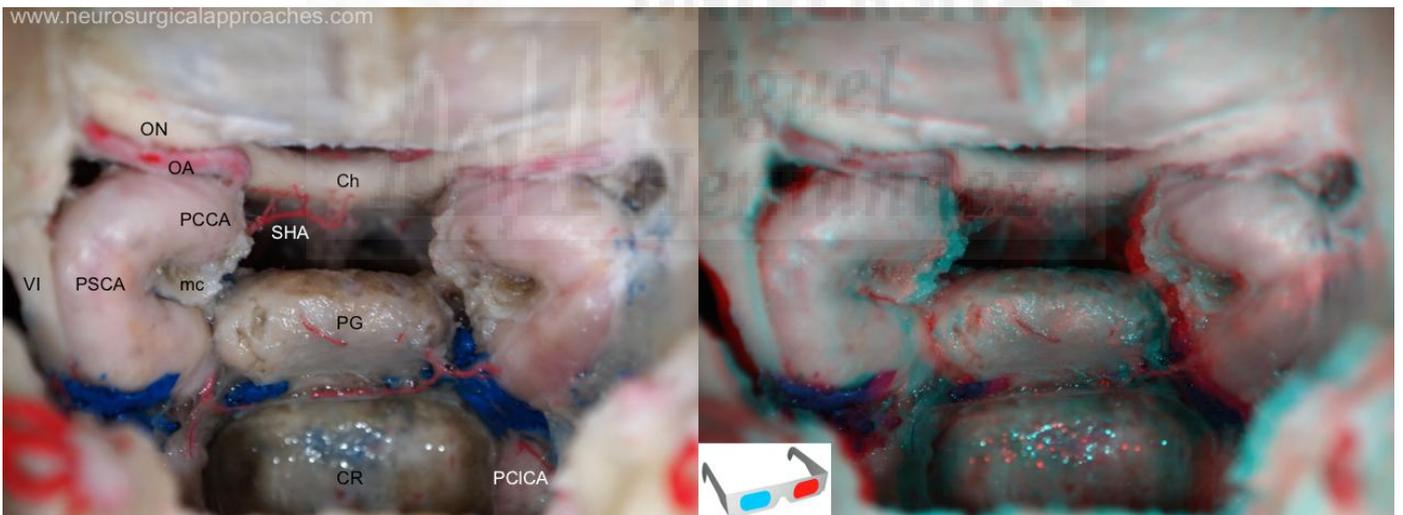


FIG 57. Imagen de disección de la anatomía a reconocer en un abordaje a través del tubérculo selar. *Ch: quiasma; CR: receso clival; mc: clinoides media; OA: arteria oftálmica; ON: nervio óptico; PCCA: segmento paraclinoideo de la arteria carótida interna; PCICA: segmento paraclival de la arteria carótida interna; PG: glándula pituitaria; PSCA: segmento paraselar de la arteria carótida interna; SHA: arteria hipofisaria superior. VI: sexto par craneal.*

Capítulo completo en: <http://3dneuroanatomy.com/endoscopic-endonasal-approach/> y en <http://3dneuroanatomy.com/sellar-parasellar-region-endonasal-intracranial/>

6.1.7 ANATOMÍA QUIRÚRGICA DEL ABORDAJE LATERAL SUPRAORBITARIO

a) Preparación del espécimen

Se usó un espécimen conservado en formol.

b) Técnica de disección.

En este caso la disección trató de simular el paso a paso del abordaje lateral supraorbitario. En primer lugar se practica una incisión en piel curvilínea a nivel fronto-temporal, seguida de la disección y retracción anterior del músculo temporal exponiendo la línea temporal superior.(Fig 58). Después realizamos la craneotomía con un agujero de trépano justo por debajo de la línea temporal superior y retrasada un par de centímetros por detrás del habitual “key hole” del abordaje pterional. (Fig 59 y 60) . Se practica la craneotomía y tras ella la durotomía que nos expone la porción orbitaria del lóbulo frontal que debe ser retraída para alcanzar la región selar, paraselar o supraselar (Fig 61).

c) Método de fotografía estereoscópica

De nuevo nos encontramos con una pieza anatómica que fijamos con un estativo craneal a la mesa de trabajo y en la que estamos realizando disección paso a paso. Con este escenario volvemos a utilizar la herramienta de la barra horizontal portátil que hemos diseñado y a la que acoplamos la cámara de fotos convencional. De este modo, en el momento que deseamos adquirir una fotografía sólo tenemos que

acercar la barra y cámara al campo de disección. En este caso no hemos tomado fotografías con macro siendo la distancia a la que hemos capturado no superior a los los 30 cms ni inferior a 10 cms . Por ello la distancia de deslizamiento horizontal de la cámara durante la captura ha sido de a penas 1 cm. En cuanto a la luz utilizada, en esta disección hemos usado el flash anular adaptado a la cámara de fotos. Al tratarse de una disección poco profunda este sistema de iluminación nos permite una distribución de la luz muy homogénea e intensa sin que se generen sombras.

d) Ventajas del 3D

Aunque este abordaje , en su fase inicial no es muy profundo, sin duda se beneficia de la percepción de profundidad cuando nos expone las diferentes capas abiertas para su realización (piel, músculo, craneotomía, durotomía y cerebro).



FIG 58. Imagen de la incisión en piel y muscular del abordaje.



FIG 59. Referencias óseas expuestas tras la retracción anterior del colgajo de piel y músculo. Se marca con *punto amarillo* el “key hole” también usado en el abordaje pterional y que se sitúa justo inferior a la *línea temporal superior (marcada con línea discontinua)* y ligeramente posterior al proceso zigomático del hueso frontal. Inferior al key hole se identifica la depresión ósea que marca la posición de la parte más lateral del ala esfenoidal.

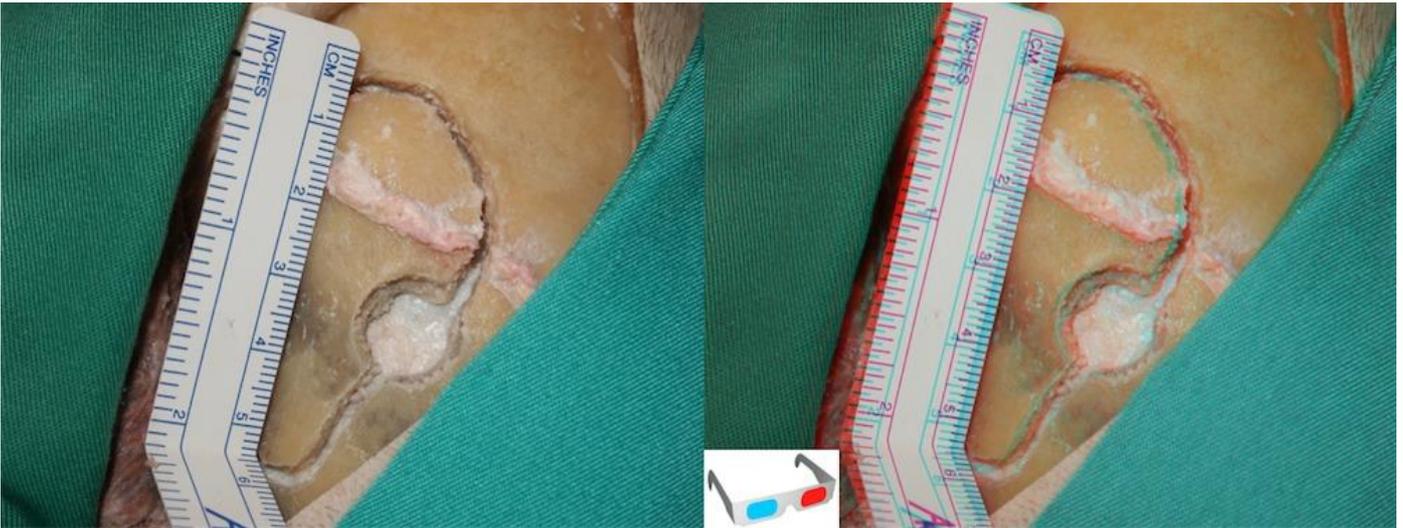


FIG 60. Se expone la craniotomía realizada que se sitúa habitualmente un tercio por encima y dos tercios por debajo de la línea temporal superior. Se mide su tamaño, que suele ser de unos 5-6 cms.



FIG 61. Imagen del abordaje tras la apertura dural con exposición de la superficie del lóbulo frontal en su pars orbitalis y triangularis y la parte más anterior del giro temporal superior. Asimismo se expone la cisura de Silvio entre ambos lóbulos.

Capítulo completo en: <http://3dneuroanatomy.com/lateral-supraorbital-approach/>

6.1.8 ANATOMÍA QUIRÚRGICA DEL ABORDAJE ANTERIOR INTERHEMISFÉRICO TRANSCALLOSO AL SISTEMA VENTRICULAR.

a) Preparación del espécimen

Se ha utilizado una cabeza cadavérica preservada en formol y con previa inyección de látex rojo y azul en el árbol vascular.

b) Técnica de disección.

De nuevo realizamos una disección paso a paso simulando la cirugía. Tras la incisión en piel a nivel de la sutura coronal, realizamos una craneotomía con 3 trépanos de apoyo, dos de ellos sobre seno sagital y otro lateral y precoronal (Fig 62). La craneotomía se diseña de forma que se extienda un centímetro contralateral, 3-4 cms ipsilateral y que tome 2/3 de área precoronal y 1/3 de área postcoronal. Se realiza la durotomía en herradura pediculada al seno sagital (Fig 63). Se accede y disecciona la cisura interhemisférica para visualizar el cuerpo calloso con las arterias pericallosas sobre su superficie (Fig 64). Después se practica una incisión sobre el cuerpo calloso que lleva al interior del ventrículo lateral. Para mejorar la visualización y la captura fotográfica se han resecado el giro frontal superior, medial y el cíngulo. Además la callosotomía ha sido amplia superando los 3 cms de largo y 1,5 cms de ancho, a modo de rectángulo. (Fig 65)

c) Método de fotografía estereoscópica

Las fase iniciales del abordaje hasta llegar al ventrículo lateral pudieron ser fotografiadas con la cámara convencional usando objetivo macro y el sistema de antenas de LED para poder proyectar la luz en el interior del ventrículo.

En este abordaje realizamos las primeras pruebas de captura fotográfica usando el capturador digital acoplado al microscopio analógico (Fig 25 y 26). Este método fue especialmente útil para las fases de fotografía a nivel de la fisura coroidea y los detalles del foramen de Monro (Fig 66). Si bien, la calidad fotográfica no es óptima.

d) Ventajas del 3D

Volvemos a encontrarnos un abordaje profundo en el que la percepción de profundidad y la correcta orientación en la disposición de estructuras en los distintos planos es fundamental. La figura 65 es un buen ejemplo de las diferentes profundidades y planos que manejamos en el abordaje. Tanto es así que la cámara no es capaz de enfocar correctamente la corteza cerebral ni la hoz cerebral cuando enfocamos la superficie del ventrículo lateral. Este fenómeno de enfoque de la estructura focalizada con desenfoque de la periferia es un fenómeno que se da también en la visión binocular fisiológica.

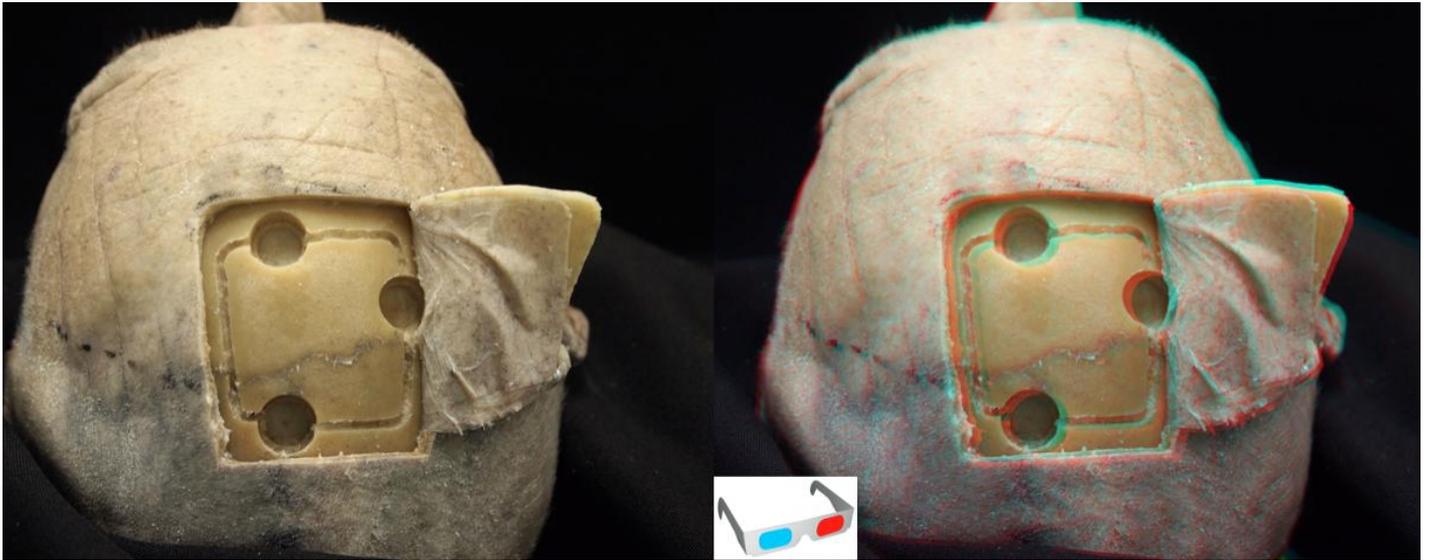


FIG 62. Imagen de la situación habitual de los trépanos en la craniotomía del abordaje. La craniotomía clásicamente se sitúa 1/3 anterior y 2/3 posterior a la sutura coronal. Se realizan 2 trépanos sobre la línea media y un trépano de apoyo lateral a nivel precoronar. La craniotomía sobrepasa ligeramente la línea media contralateralmente.



FIG 63. Imagen de la apertura dural. El colgajo dural se realiza pediculado con base al seno sagital y sobre éste se rebate de modo que queda expuesta la parte más superficial de la cisura interhemisférica. Precisamente esta cisura es la que se utiliza para realizar el abordaje. Véase la situación de una espátula separando lateralmente el cerebro para favorecer el abordaje.

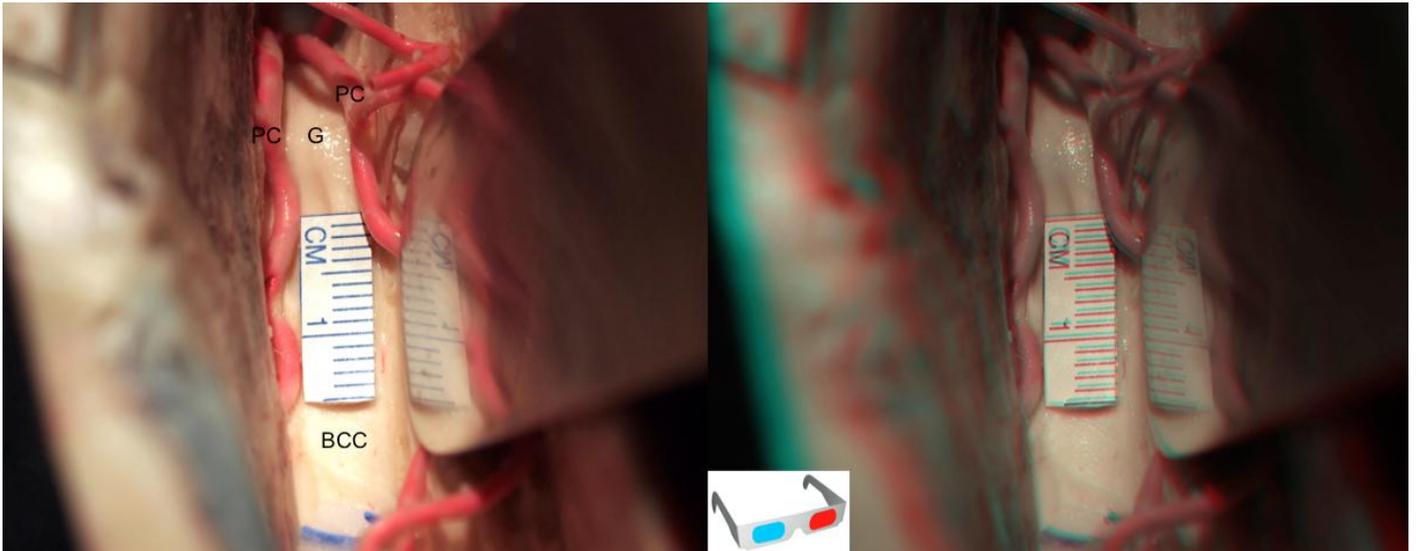


FIG 64. Véase en esta disección como tras la disección de la cisura interhemisférica se alcanza la superficie del cuerpo calloso. Sobre dicha superficie asientan las arterias pericallosas de ambos lados que deben ser disecadas y separadas para realizar la apertura del cuerpo calloso (también llamada callosotomía) . La longitud de la callosotomía no suele sobrepasar los 2 cms.

BCC: cuerpo del cuerpo calloso; G: rodilla (del cuerpo calloso); PC: arterias pericallosas.

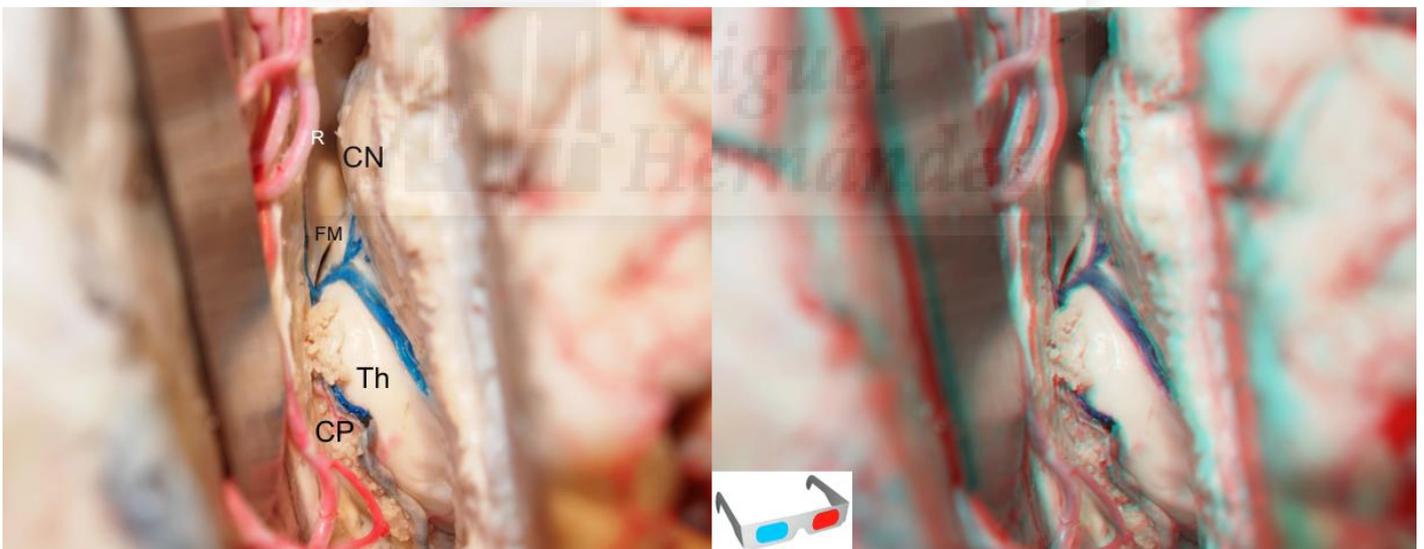


FIG 65. En esta imagen se representa la visión del ventrículo lateral desde el abordaje transcalloso. Para facilitar la descripción anatómica se ha realizado una callosotomía amplia.

CN: cabeza del núcleo caudado; CP: plexo coroideo; FM: foramen de Monro; R: receso o asta frontal; Th: tálamo.

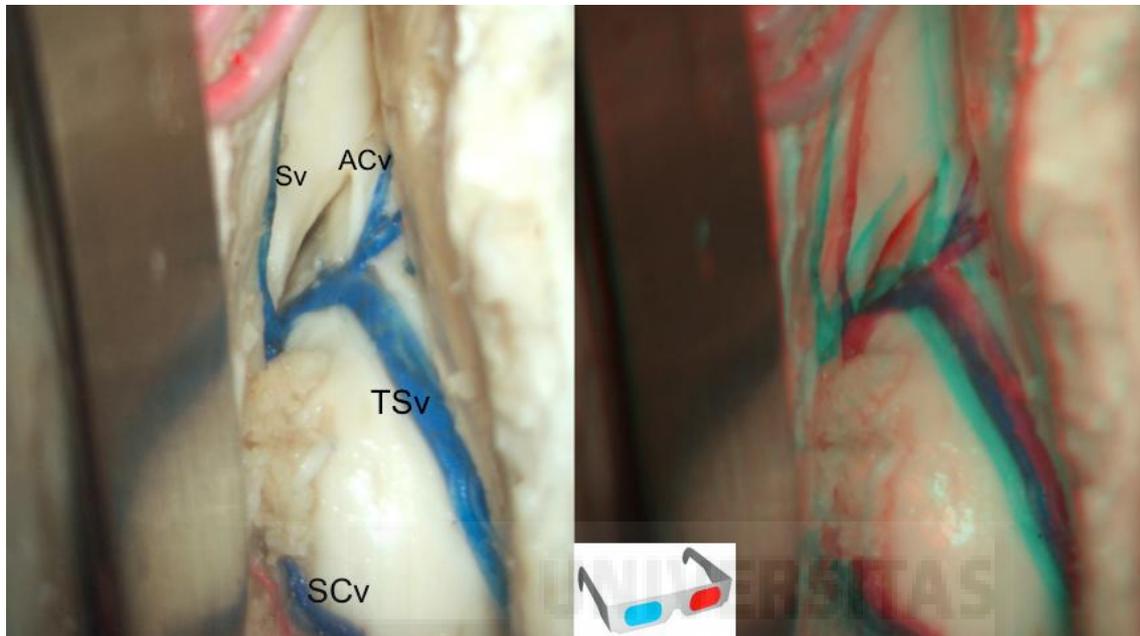


FIG 66. Imagen microscópica del suelo del ventrículo lateral derecho con el foramen de Monro y el plexo coroideo proyectado posteriormente. En esta región, las principales referencias anatómicas son las venas.

Acv: vena caudada anterior; SCv: vena coroidea superior; Sv: vena septal.; TSv: vena talamoestriada.

Capítulo completo en: <http://3dneuroanatomy.com/anterior-interhemispheric-transcallosal-approach/>

6.1.9 ANATOMÍA DEL ABORDAJE RETROSIGMOIDEO AL ÁNGULO PONTOCEREBELOSO

a) Preparación del espécimen

Para mostrar la anatomía de este abordaje utilizamos cabeza preservada en formol con inyección en látex rojo y azul. Si bien, el látex rojo no pudo alcanzar de forma correcta las arterias cerebelosas en su tramo más distal.

b) Técnica de disección.

La disección se llevó a cabo siguiendo el paso a paso del abordaje retrosigmoideo. La incisión lineal a nivel retroauricular exponiendo las referencias óseas (principalmente el punto asterion y la apófisis mastoides). Después, situando el trépano sobre asterion se realiza una craneotomía que expone la duramadre situada inferior al seno transversal y la situada medial al seno sigmoideo. Se practica una durotomía siguiendo un trayecto paralelo a ambos senos venosos que nos expone la superficie suboccipital del cerebelo. Entre la cara cerebelosa del hueso temporal y el cerebelo disecamos el ángulo pontocerebeloso y su contenido vasculo-nervioso. Esta disección resulta compleja y consiste en liberar de aracnoides todos los nervios y vasos con técnica microquirúrgica. Para mostrar de una forma más intuitiva la posición de los senos venosos duros hemos abierto ambos y expuesto el material de látex azul contenido en su interior.

c) Método de fotografía estereoscópica

Las fases iniciales del abordaje fueron fotografiadas por el método de la cámara convencional ajustada a la barra horizontal portátil ya explicado en otros capítulos de abordajes. Sin embargo, una vez que se accede al ángulo ponto-cerebeloso (entre hueso temporal y cara petrosa del cerebelo) nos encontramos con un espacio estrecho en el que acceder con la iluminación de la cámara es complejo incluso con el sistema de antenas LED. Por ello, tal y como hicimos con el abordaje transcalloso al ventrículo lateral, utilizamos la captura fotográfica digitalizada procedente de la imagen del microscopio analógico del laboratorio (Fig 69 y 70).

d) Ventajas del 3D

La peculiar anatomía del ángulo pontocerebeloso, nos muestra los nervios craneales (V a XII) , el complejo venoso petroso superior y las arterias cerebelosas (superior, anteroinferior y posteroinferior) disponiéndose de forma ordenada haciendo un recorrido cisternal libre desde el tronco encéfalo hasta su salida por diferentes orificios del hueso temporal y occipital. Para el cirujano que debe intervenir la patología localizada en esta región será fundamental tener un claro conocimiento de la relación espacial que mantiene todo este entramado de vasos y nervios.

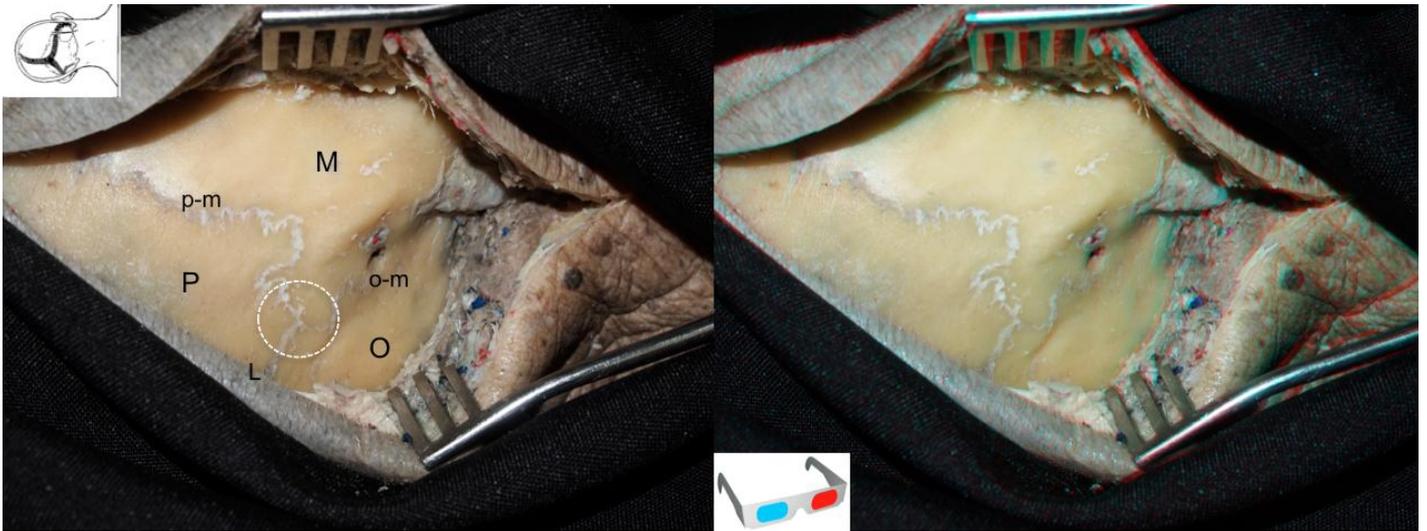


FIG 67. Se exponen las referencias óseas de la región retromastoidea. El punto craneométrico más importante para planificar la craniotomía es el asterion (marcado con un círculo en blanco).
L: lambda; M: mastoides; O: hueso occipital; o-m: sutura occipito-mastoidea; P: hueso parietal; p-m: sutura parieto-mastoidea.

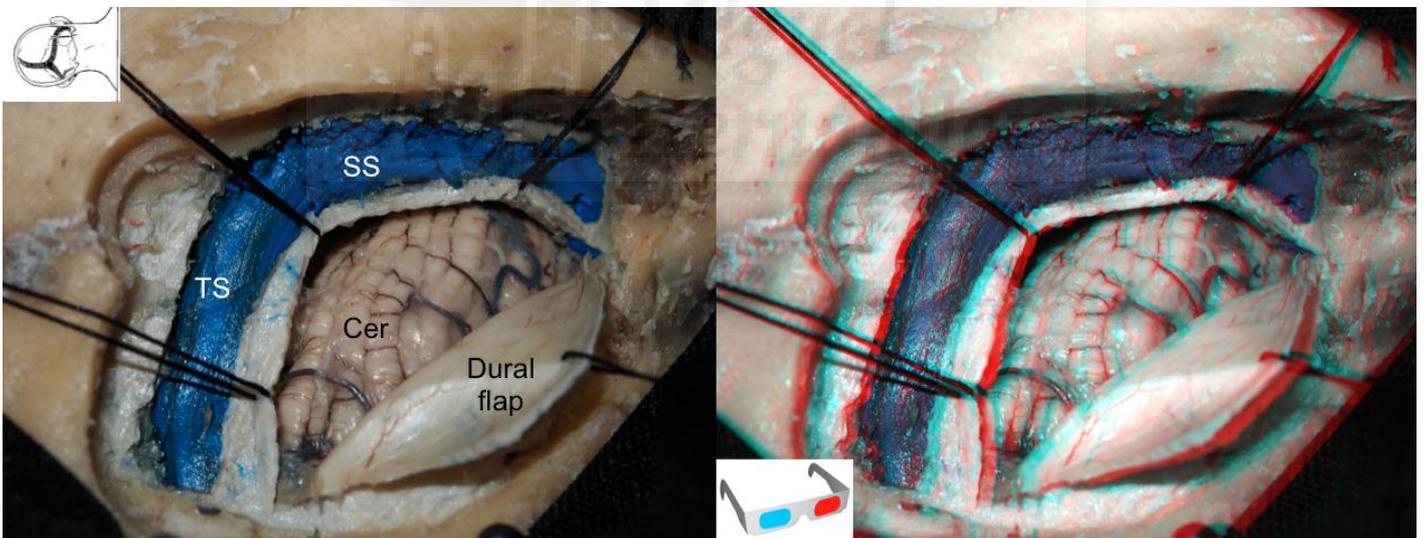


FIG 68. Se exponen la confluencia entre el seno sigmoide (SS) y el seno transversero (TS). Inferior al transversero y posterior al sigmoide se realiza la apertura dural. Véase la exposición del cerebelo tras la apertura dural.
Cer: cerebelo; SS: seno sigmoide; TS: seno transversero.

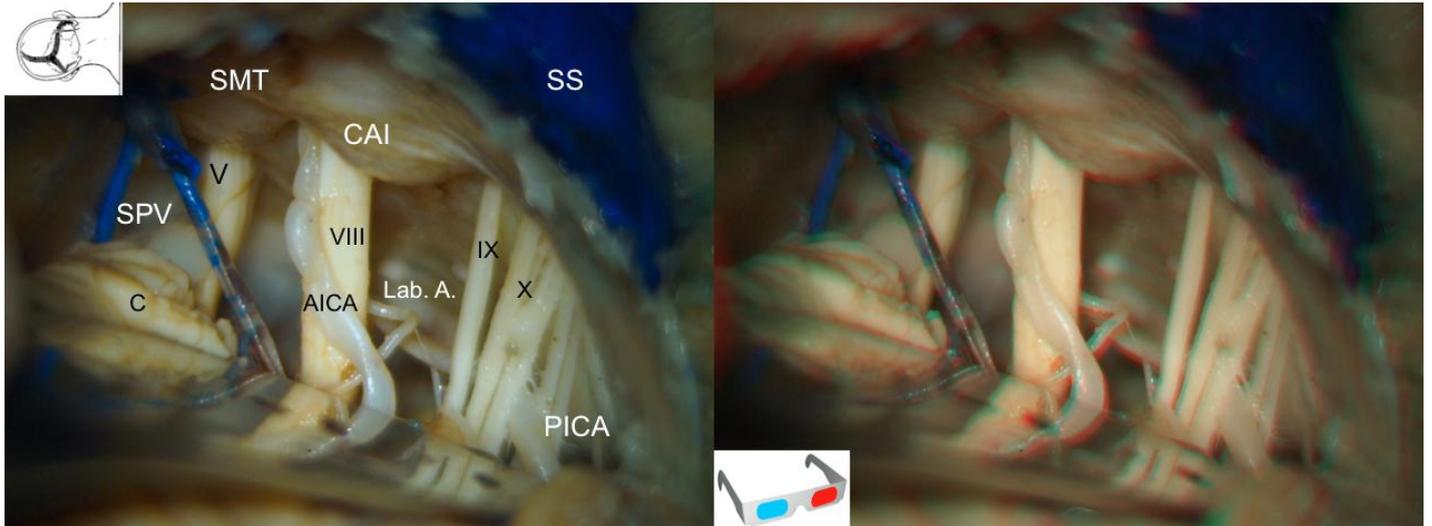


FIG 69. Imagen del ángulo pontocerebeloso y su anatomía.

AICA: arteria cerebelosa anteroinferior; C: cerebelo; CAI: conducto auditivo interno; Lab. A.: arteria laberíntica; PICA: Arteria cerebelosa posteroinferior; SMT: tubérculo suprameatal; SPV: vena petrosa superior; SS: seno sigmoide. Pares craneales representados: V, VIII, IX y X.

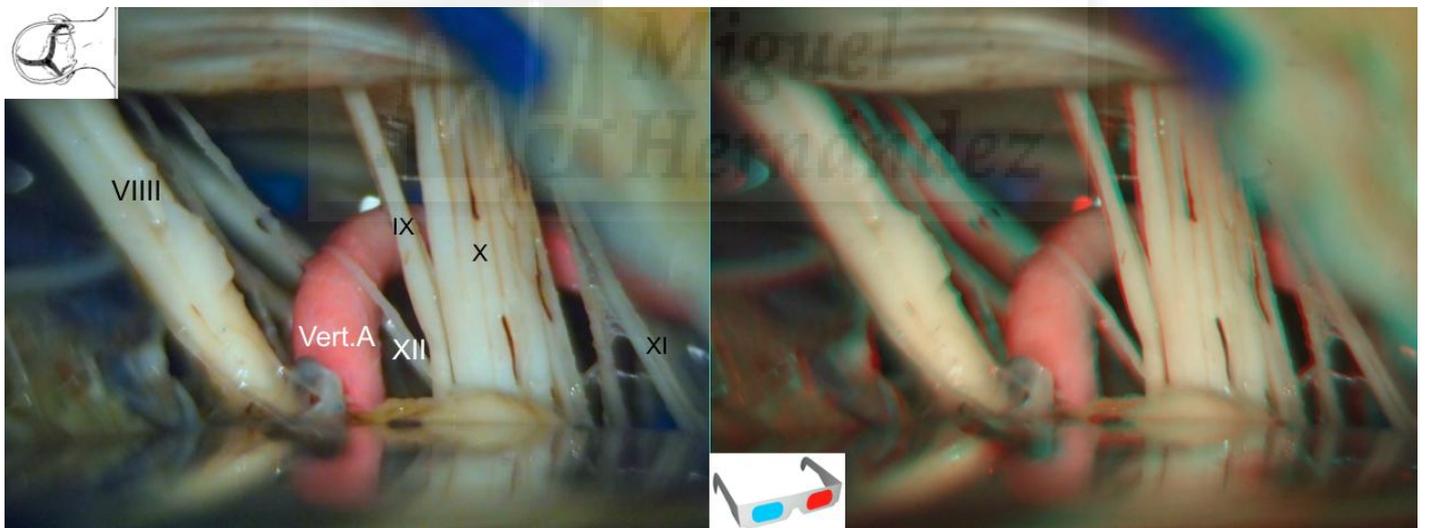


FIG 70. Imagen de la porción mas inferior del ángulo pontocerebeloso al nivel del foramen yugular. Vert. A: arteria vertebral; VIII, IX, X, XI y XII pares craneales.

Capítulo completo en: <http://3dneuroanatomy.com/retrosigmoid-approach/>

6.1.10 ANATOMÍA DEL ABORDAJE INFRATENTORIAL SUPRACEREBELOSO A LA GLÁNDULA PINEAL⁹⁰⁻⁹⁸**a) Preparación del espécimen**

Pieza preservada en formol con inyección de látex en rojo y azul.

b) Técnica de disección.

Seguimos los pasos necesarios para realizar el abordaje infratentorial supracerebeloso. Se practica una incisión en línea media 1/3 por encima de la tórcula y 2/3 por debajo de ésta. Se practica craniotomía con 3 trepanos, 2 de ellos a cada lado de la línea media sobre el seno transversal y otro 1-2 cms en línea media sobre la tórcula. Se expone al área dural donde confluyen ambos senos transversos y el seno sagital en la tórcula, prensa de herófilo o confluencia de los senos. La durotomía se practica como un colgajo en forma de U con pedículo hacia el seno transversal. De este modo se expone el espacio situado entre el tentorio y la cara superior del cerebelo y vermis. La disección de este espacio atraviesa varias venas hemisféricas y vermianas hasta llegar a la cisterna de la lámina cuadrigémina y pineal donde se diseca y describe el complejo sistema venoso que confluye en la vena de Galeno. En esta región anatómica, la principal anatomía a reconocer es la venosa, por tanto, para darle más importancia hemos retirado la pared venosa dejando expuesto el látex azul que las rellena por dentro. Se trata de una inyección en la que dicho látex ha quedado lo suficientemente solidificado para poder hacerlo.

c) Método de fotografía estereoscópica

Para esta disección utilizamos 3 métodos de fotografía descritos:

1-El método de cámara sobre trípode convencional con el flash anular adaptado a la cámara. (Fig 71 y 72)

2-El método de captura 3D a través del microscopio (Fig 73)

3-El método de fotografía endoscópica (Fig 74)

d) Ventajas del 3D

Nos encontramos en este caso de nuevo con una “anatomía escondida” en la que es necesario atravesar un espacio estrecho (cisura supracerebelosa e infratentorial) antes de acceder a un espacio cisternal en la que las estructuras venosas tienen una disposición determinada y que habitualmente el cirujano disecciona con visión microscópica y, por tanto, estereoscópica.

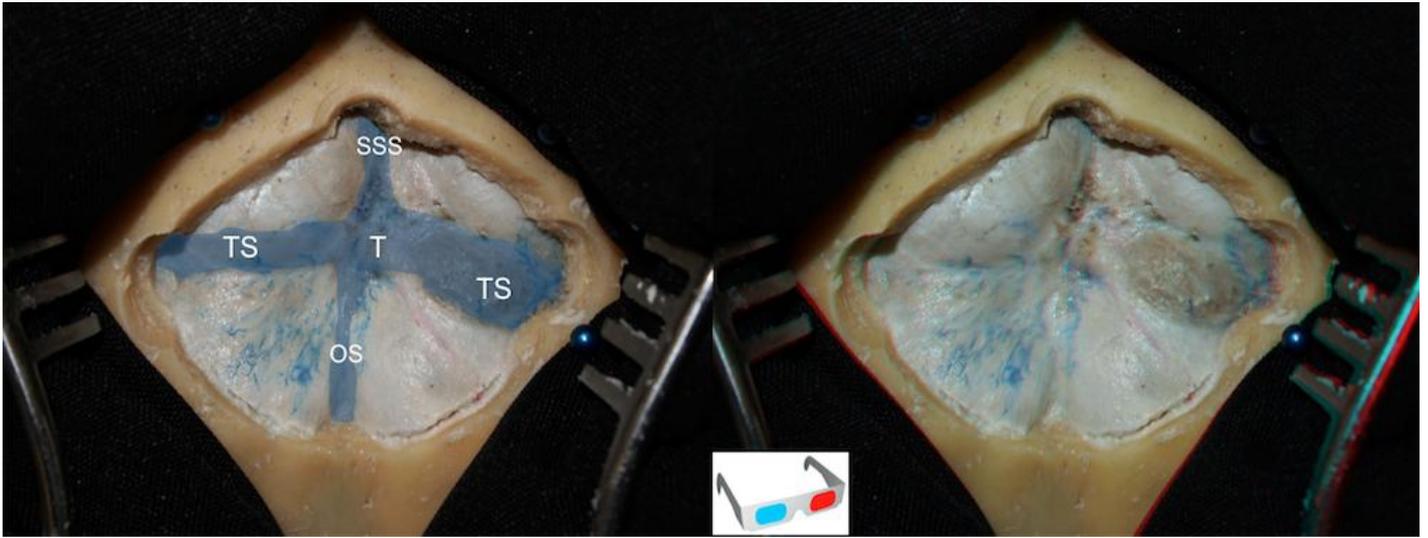


FIG 71. Se expone una fotografía de la craneotomía practicada para realizar el abordaje. Como norma se extiende 1/3 por encima y 2/3 por debajo del seno transversal de forma que se expone la totalidad de la tórula.

OS: seno occipital; SSS: seno sagital superior; T: tórula o prensa de Herófilo; TS: seno transversal.

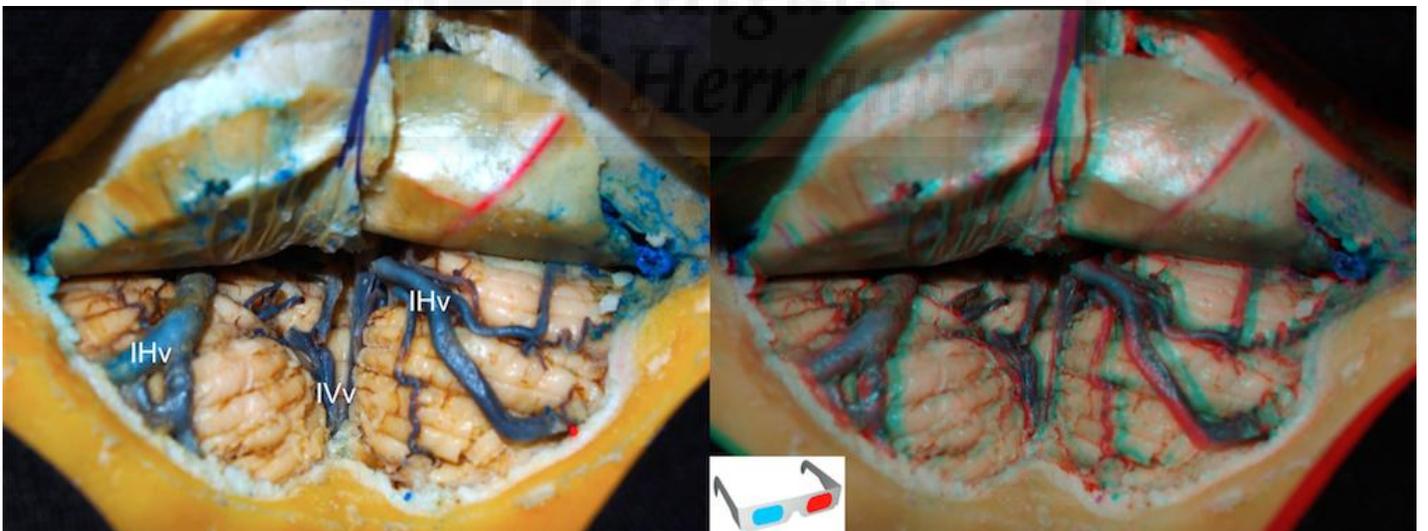


FIG 72. La duramadre se abre a modo de colgajo curvo pediculado hacia el seno transversal. En la parte superior de la superficie occipital del cerebelo se aprecian: en la línea media la vena vermiana inferior y lateralmente las venas hemisféricas cerebelosas. Estas venas pueden ser cauterizadas y seccionadas si es preciso para acceder el espacio supracerebeloso infratentorial .

IHv: venas hemisféricas inferiores; IVv: vena vermiana inferior.

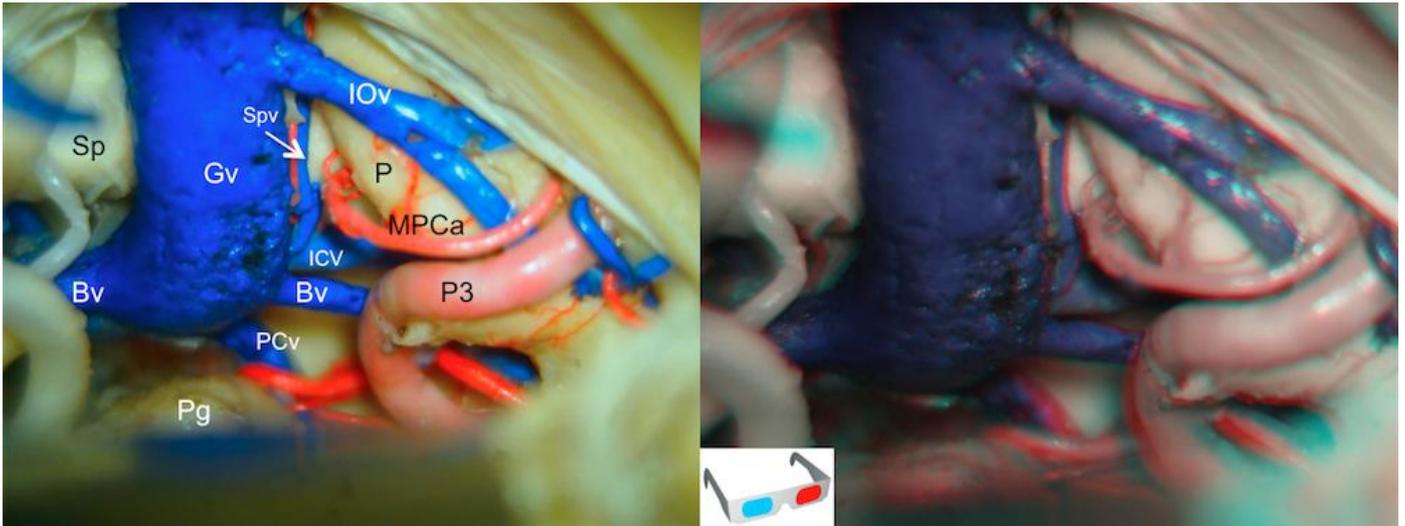


FIG 73. Visión microscópica del la cisterna cuadrigémina y de la región posterior de la incisura tentorial.

Apreciamos un complejo sistema venoso que se situa abrazando el esplenio del cuerpo calloso y sobre la glándula pineal.

Bv: vena basal de Rosenthal; Gv: vena de Galeno; ICV: vena cerebral interna; IOv: vena occipital interna; MPCa: arteria coroidea medial posterior; P: giro parahipocampal; P3: tercer segmento de la Arteria cerebral posterior; PCv: vena precentral; Pg: glándula pineal; Sp: esplenio del cuerpo calloso; Spv: vena del esplenio del cuerpo calloso.

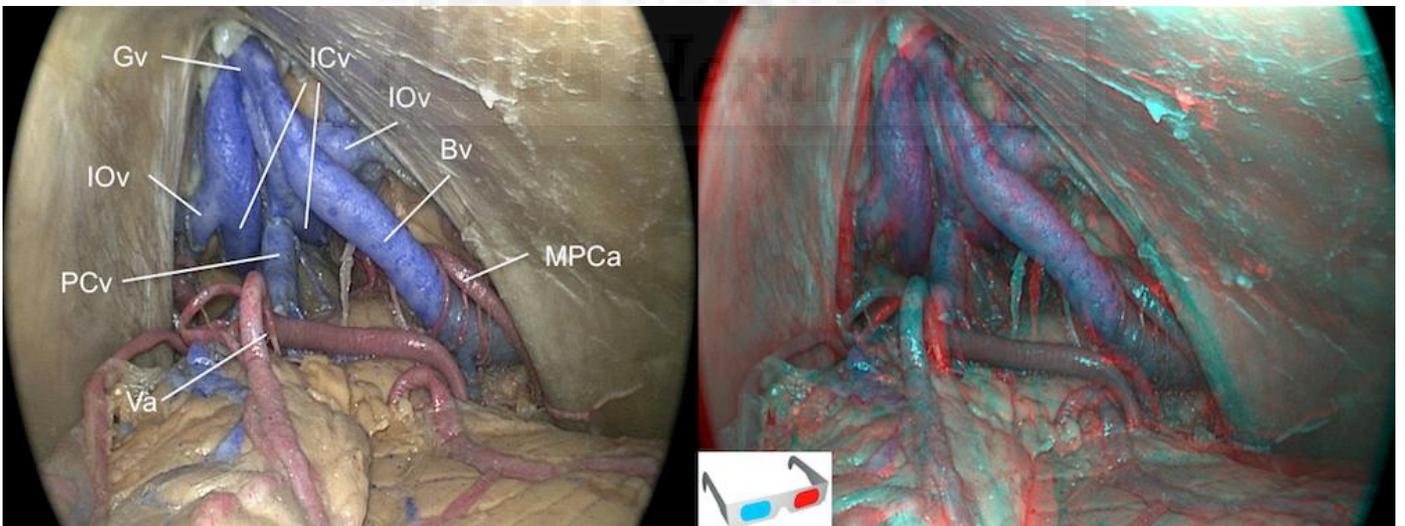


FIG 74. Visión endoscópica de la misma región.

Bv: vena basal de Rosenthal; Gv: vena de galeno; ICv: vena cerebral interna; IOv: vena occipital interna; MPCa: arteria coroidea medial posterior; PCv: vena precentral; Va: Ramas vermianas de la arteria cerebelosa superior.

Capítulo completo en: <http://3dneuroanatomy.com/infratentorial-supracerebellar-approach/>

6.1.11 ANATOMÍA QUIRÚRGICA DE LA REGIÓN SUPRASELAR Y DEL SENO CAVERNOSO^{85,99}

a) Preparación del espécimen

Preparamos un espécimen preservado en formol con inyección en azul y rojo.

b) Técnica de disección.

El objetivo de esta disección era mostrar la región selar y paraselar desde una doble visión: la intracraneal y la endonasal. Para este trabajo no contamos con la ayuda de un endoscopio por lo que optamos por realizar en la cabeza un corte coronal con una tomógrafo a la altura de ambos senos maxilares.

Para mostrar la visión endonasal hicimos una disección progresiva microscópica en la que practicamos una etmoidectomía, resección de cornetes, exposición de las fosas pterigopalatinas, esfenoidotomía, fresado de toda la cobertura osea del interior del esfenoides (región selar, tubérculo selar, ambos senos cavernosos y región clival) y, finalmente, apertura dural y disección de los elementos vasculo-nerviosos de la región selar, supraselar y ambos senos cavernosos.

Para mostrar la visión intracraneal retiramos de la cabeza la mitad anterior del hemisferio cerebral derecho dejando disecadas la fosa anterior y media. Dejamos íntegra la vía óptica, la arteria carótida con su bifurcación y realizamos una disección del seno cavernoso derecho.

De este modo pudimos tener una visión simultánea de la región selar y paraselar desde ambas vías de abordaje.

c) Método de fotografía estereoscópica

En este abordaje usamos fundamentalmente el trípode portátil con la cámara convencional ajustada. En las fotografías tomadas desde la vía endonasal nos encontramos una disección abierta (no a través de la nariz) pero aun así necesitamos hacer uso de las antenas de iluminación LED y del objetivo macro para conseguir buen detalle de la anatomía.

d) Ventajas del 3D

Al correlacionar estructuras desde dos puntos de vista diferentes, la percepción de la profundidad real entre estructuras resultó especialmente útil.



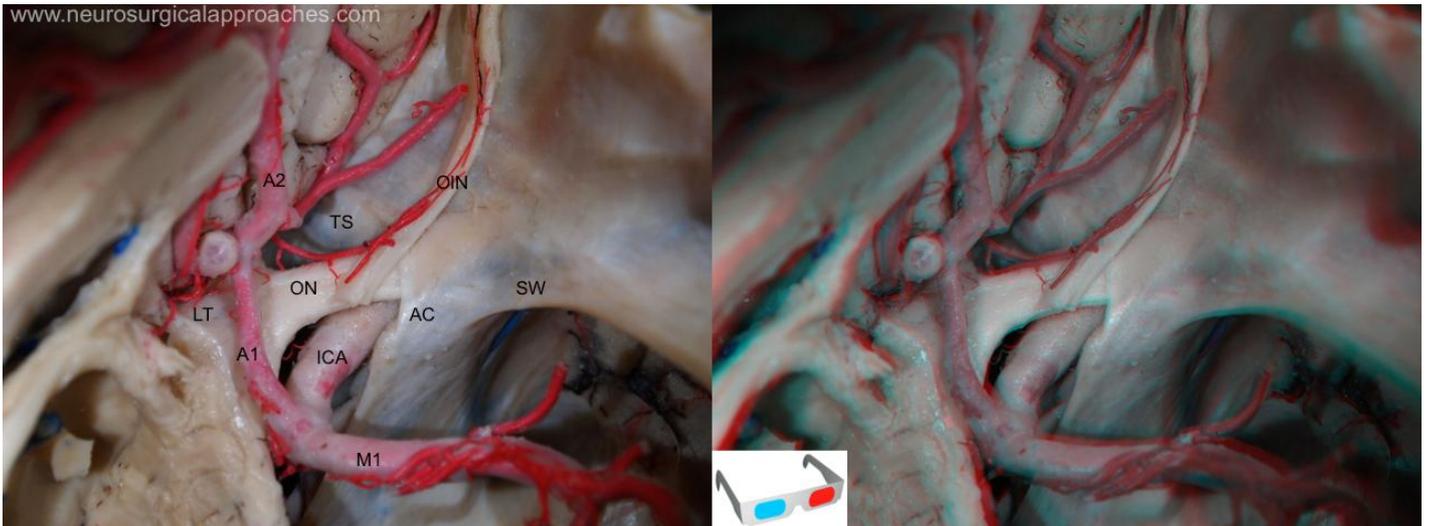


FIG 75. Visión intracraneal superior y oblicua de la región supraselar y paraselar derecha. Se ha extirpado el hemisferio cerebral derecho para facilitar la visión anatómica.

A1: segmento precomunicante de la arteria cerebral anterior; A2: segmento postcomunicante de la arteria cerebral anterior; AC: apófisis clinoides anterior; ICA: Arteria carótida interna; LT: lámina terminalis; M1: segmento prebifurcación de la arteria cerebral media; ON: nervio óptico; OIN; nervio olfatorio; SW: ala esfenoidal; TS: tubérculo selar.

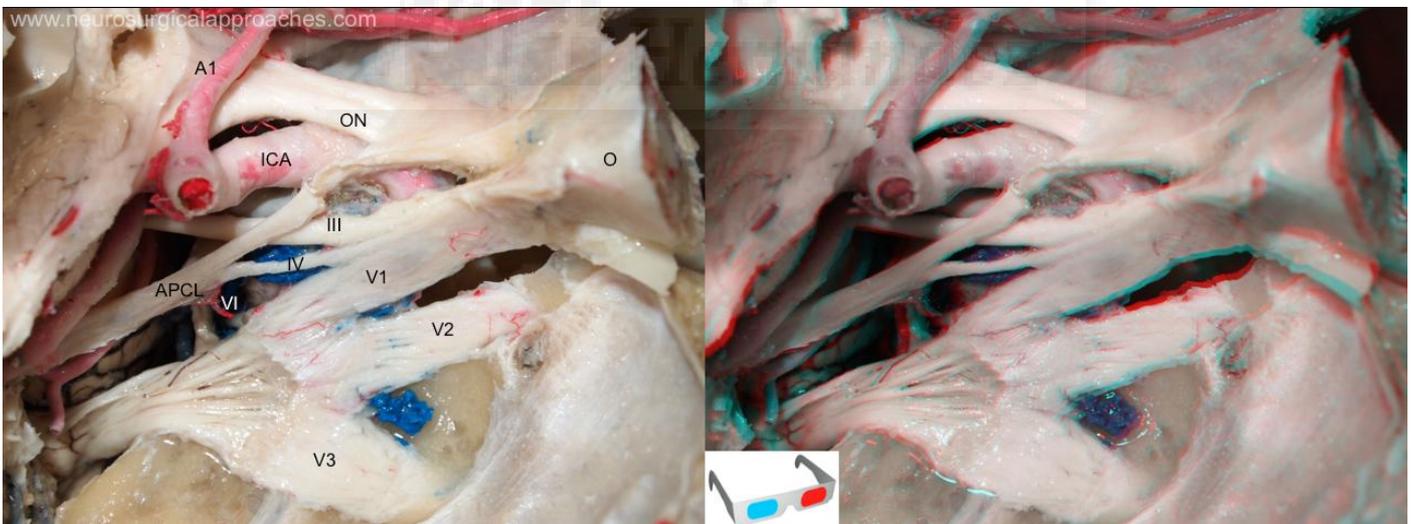


FIG 76. Imagen lateral de la disección del seno cavernoso derecho después del peeling dural y una clinoidectomía anterior.

III: tercer par craneal; IV: cuarto par craneal; V1-3: tres ramas del trigémino; VI: sexto par craneal; A1: segmento precomunicante de la arteria cerebral anterior; APCL: ligamento petroclinoideo anterior; ICA: arteria carótida interna; O: órbita; ON: nervio óptico.

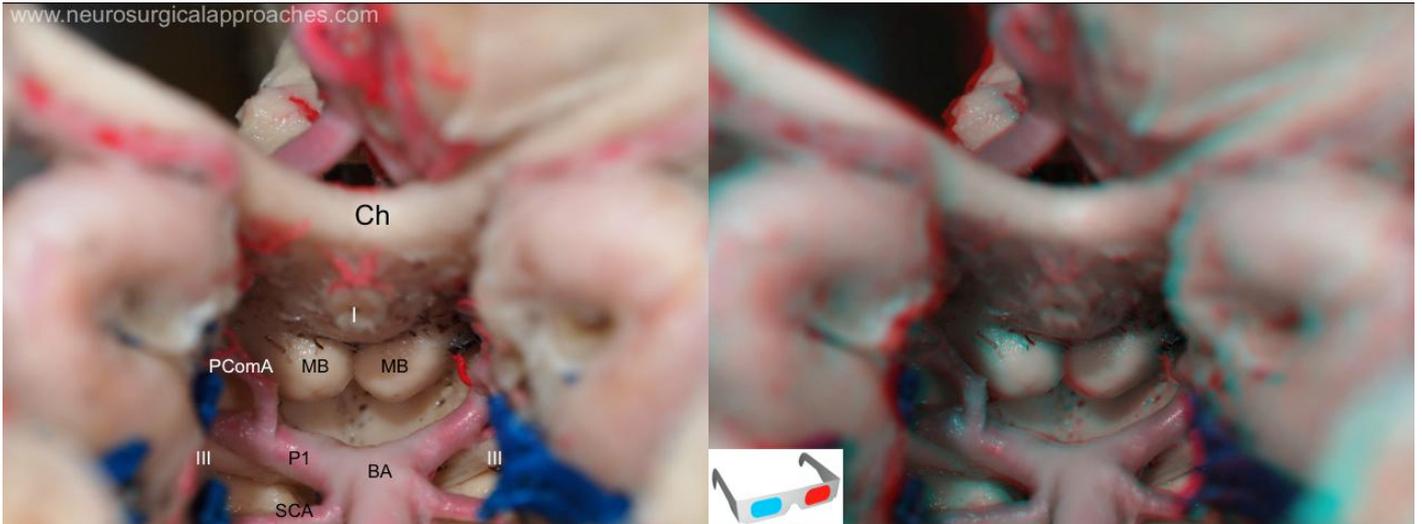


FIG 77. Exponemos a continuación la región retroselar o cisterna interpeduncular. Hemos extirpado la glándula hipofisaria para mejorar la visión anatómica.

III: tercer par craneal; BA: arteria basilar; Ch: quiasma óptico; I: infundíbulo hipofisario; MB: cuerpos mamilares; P1: segmento precomunicante de la arteria cerebral posterior; PComA: arteria comunicante posterior; SCA: arteria cerebelosa superior.

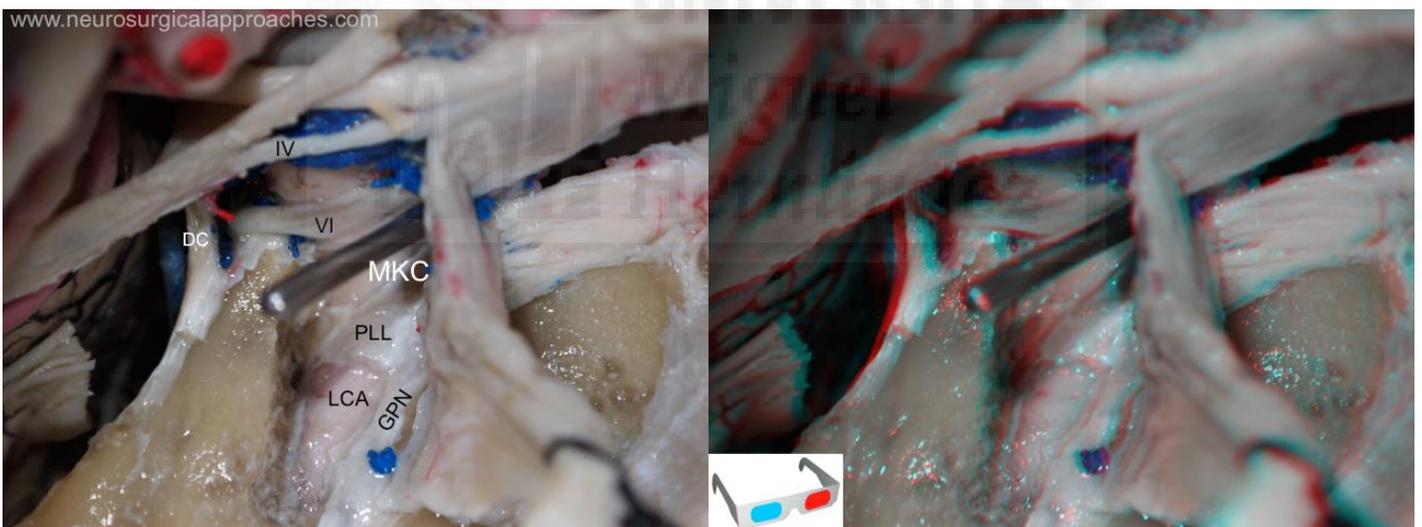


FIG 78. Hemos seccionado el tronco del trigémino a nivel cisternal y lo hemos movilizado anteriormente para exponer la región posterior del seno cavernoso. Además del Meckel's cave (MKC) vemos la porción superior del foramen lacerum y el trayecto de la arteria carótida que lleva su nombre (LCA). Cubriendo la carótida a ese nivel el ligamento petrolingual (PLL). Y pasando por debajo del canal del dorello (DC) hacia el seno cavernoso vemos el sexto par craneal (VI). Se puede apreciar parte del trayecto del nervio petroso mayor (GPN) sobre la carótida.

IV: cuarto par craneal; VI: sexto par craneal; DC: canal de Dorello; GPN: nervio petroso mayor; LCA: segmento lacerum de la arteria carótida interna; MKC: Cavum de Meckel; PLL: ligamento petrolingual.

Capítulo completo en: <http://3dneuroanatomy.com/sellar-parasellar-region-endonasal-intracranial/>

6.1.12 ANATOMÍA QUIRÚRGICA DEL RAQUIS

a) Preparación del espécimen

La disección en columna la hemos realizado con cadáveres preservados en la técnica de Thiel⁷³. Este método nos permite mantener la piel y partes blandas con aspecto y textura real. Especialmente impactante es la preservación del músculo que mantiene el color similar al vivo. Dado que la disección va a requerir una gran separación de partes blandas y músculo, ésta técnica nos permite conseguir tal objetivo. No llegamos a abrir en ningún momento la duramadre del saco tecal ni raíces con lo cual el hándicap de la mala preservación del tejido neural con esta técnica no afectó al resultado de las fotografías.

b) Técnica de disección.

Llevamos a cabo la disección de 3 tipos de abordaje:

1- Lumbar posterior. Practicamos una disección secuencial que se inició con una incisión en línea media desde T12 hasta sacro. Se realiza una separación subperióstica de la musculatura paravertebral para exponer las láminas, articulaciones y apófisis transversas de las vertebrae lumbares y sacro. Una vez alcanzada esta exposición osea se practican varios abordajes comunes en cirugía espinal: una hemilaminectomía para discectomía, una laminectomía completa, un abordaje transforaminal y transarticular y un abordaje extraforaminal. Se simula la colocación de tornillos traspediculares e incluso la colocación de una caja intersomática (Fig 79) Se finaliza la disección

mostrando la exposición completa del saco tecal y raíces lumbosacras que constituyen la cola de caballo (Fig 80).

2-Cervical anterior. Se realizó una disección amplia mostrando toda la anatomía muscular y vásculo-nerviosa que se suele atravesar hasta alcanzar el espacio prevertebral para realizar el clásico abordaje cervical anterior para la discectomía o corpectomía (Fig 83 y 84).

3-Cervical posterior. Se muestra la disección secuencial para mostrar la musculatura y elementos óseos de la región cervical posterior (Fig 82). Se finaliza la disección con laminectomías/foraminotomías selectivas y colocación de tornillos en los diferentes niveles cervicales.

Se fotografían también modelos óseos sintéticos para mostrar de un modo docente y esquemático los procedimientos que a su vez se disecan en cadáver (Fig 81).

c) Método de fotografía estereoscópica

Esta disección la llevamos a cabo en varias fases sobre un cadáver completo sin separar en piezas. Por tanto, para fotografiar cada paso de la disección tuvimos que acercarnos a cada región expuesta buscando a veces ángulos complejos. Este tipo de fotografía es la que, como ya explicamos, se beneficia en mayor medida del uso del trípode de diseño propio que pudimos colocar en diferentes posiciones para conseguir capturas cenitales de los abordajes realizados. Según la proximidad de la fotografía usamos el objetivo estándar de la cámara o para detalles el objetivo macro. El sistema de iluminación usado en este caso, al tratarse de campos abiertos fue el flash anular adaptado a la cámara. Si bien, en el caso de la fotografía de la corpectomía la captura requirió el uso del sistema de antenas con luz LED(Fig 84).

d) Ventajas del 3D

La anatomía del raquis está basada principalmente en su componente óseo. La planificación de los abordajes al raquis, ya sea con fines descompresivos o con ayuda de instrumentación requiere un conocimiento exacto de la relación espacial entre los elementos de las vertebrae, sus ligamentos y sus espacios articulares (discales y facetarios). La figura 79 es un buen ejemplo de lo complicado que resulta explicar la anatomía en una fotografía 2d (izquierda) para una persona no experta en los abordajes. Su correspondiente fotografía en 3d (derecha) ilustra perfectamente el beneficio de percibir los elementos en su profundidad real.



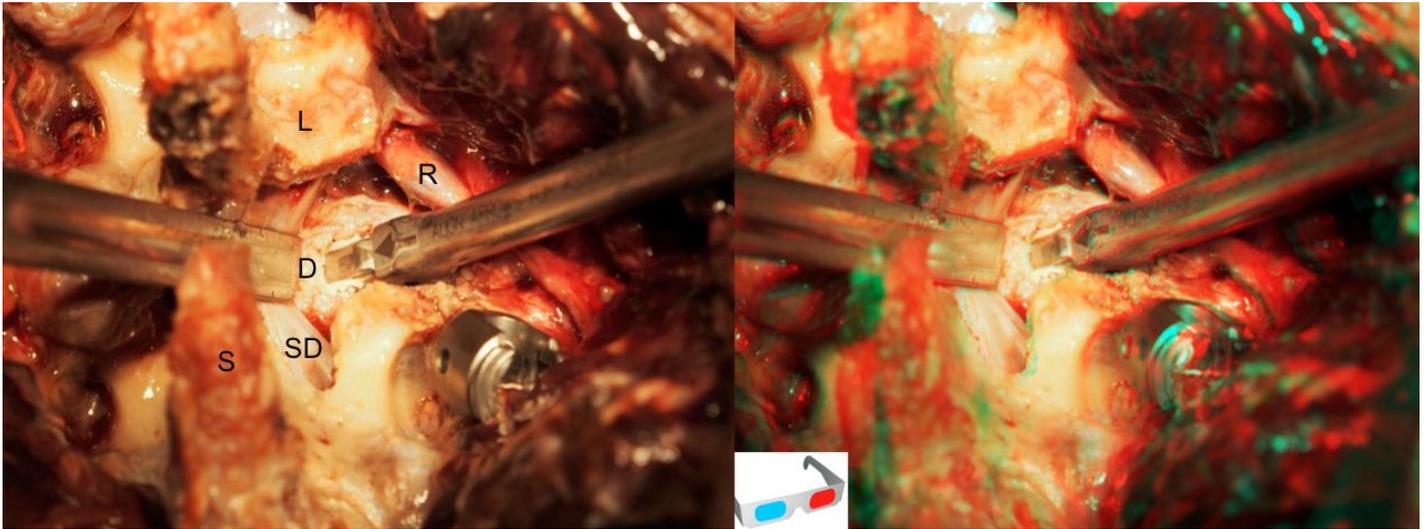


FIG 79. Imagen de la anatomía implicada en el procedimiento TLIF (transforaminal lumbar interbody fusion). En la región paravertebral derecha del espécimen se ha practicado una resección de la carilla articular superior que expone el espacio discal y la raíz nerviosa ipsilateral. Tras la disectomía y separando medialmente el saco tecal se introduce una caja intersomática en el espacio discal.

D: disco intervertebral; L: lámina vertebral; R: raíz nerviosa lumbar; S: apófisis espinosa; SD: saco dural.

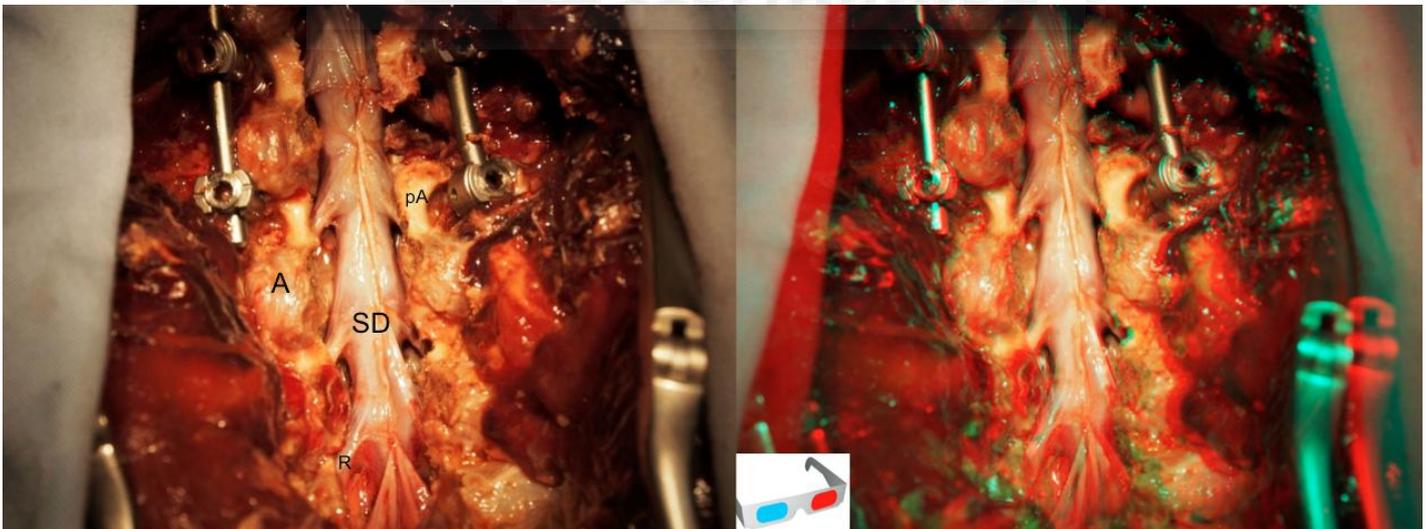


FIG 80. Disección que simula la clásica descompresión quirúrgica multinivel lumbosacra . Se extirpan las láminas vertebrales respetando las articulaciones a ambos lados. Se visualiza la exposición del saco dural y las raíces nerviosas en busca de sus correspondientes forámenes de conjunción.

A: articulación lumbar; pA: pars articularis; R: raíz lumbar; SD: saco dural.

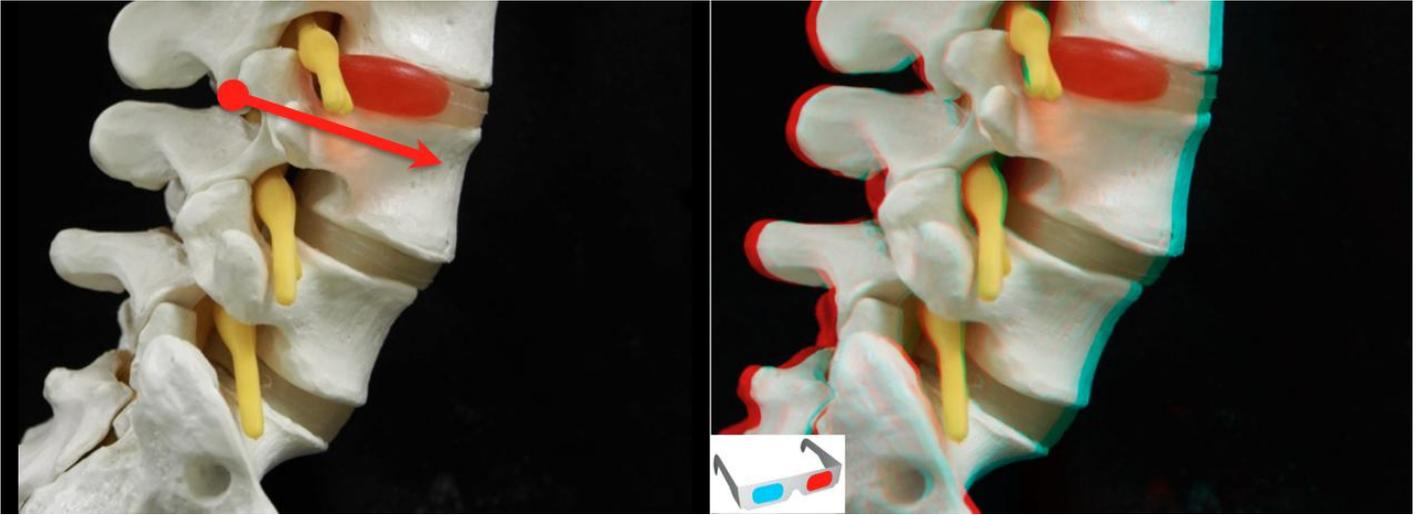


FIG 81. Imagen ilustrativa de la trayectoria de un tornillo transpedicular lumbar en la visión sagital.

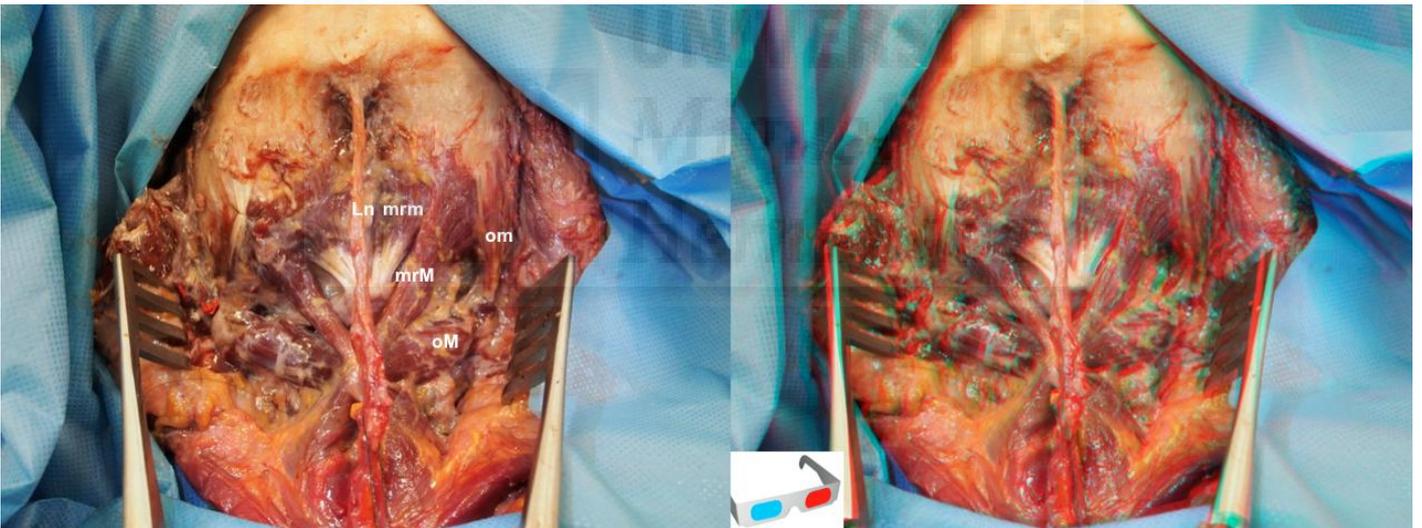


FIG 82. Disección de la musculatura profunda de la región occipito-cervical posterior.
Ln: ligamento nucal; *om*: músculo oblicuo menor de la cabeza; *oM*: músculo oblicuo mayor de la cabeza;
mrM: músculo recto mayor de la cabeza; *mrm*: músculo recto menor de la cabeza.

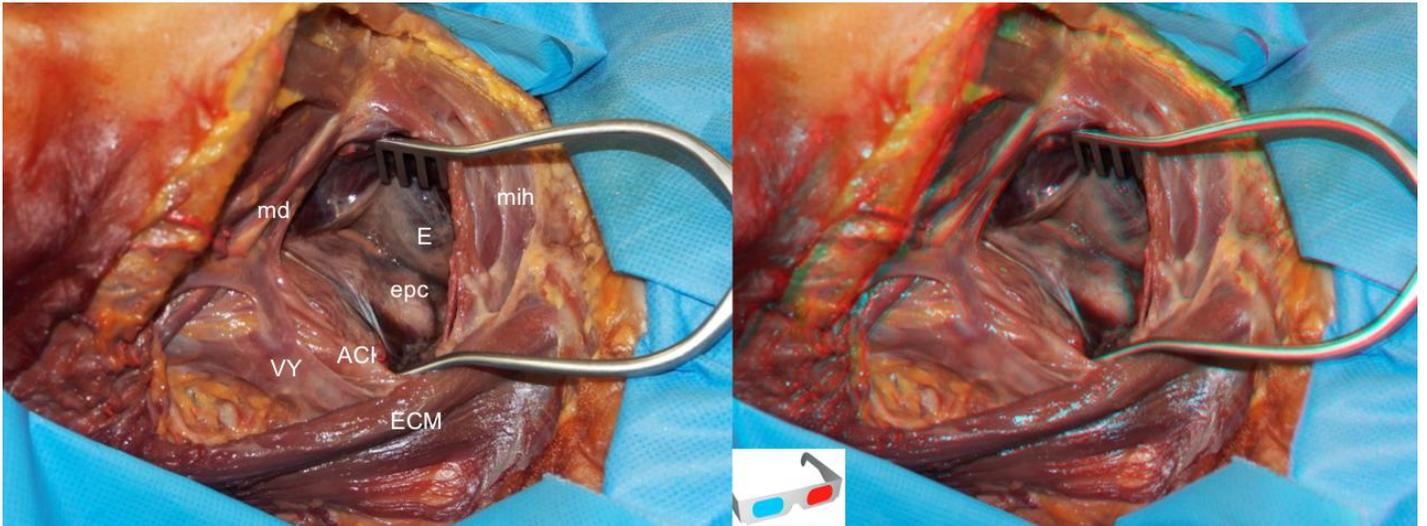


FIG 83. Imagen anatómica de un abordaje cervical anterior al espacio prevertebral. Se accede a este espacio dejando lateralmente el músculo esternocleidomastoideo y el paquete vascular y medialmente el esófago y la tráquea.

ACI: arteria carótida interna; E: esófago; ECM: músculo esternocleidomastoideo; epc: espacio prevertebral cervical; md: músculo digástrico; mih: musculatura infrahioidea; VY: vena yugular interna

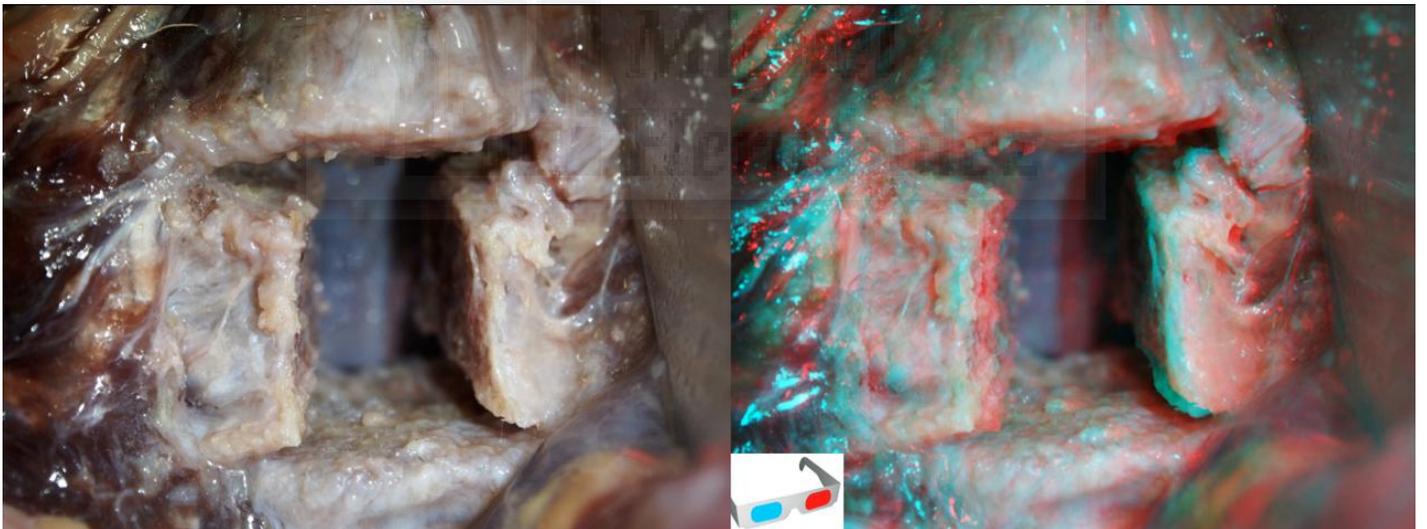


FIG 84. Imagen de una corpectomía anterior realizada entre dos espacios discales.

6.2 Aceptación del método de aprendizaje por estereoscopia 3D.

Aunque el trabajo actual es la descripción de un método de aprendizaje y no pretende medir ningún parámetro, podemos aportar a los resultados algunos datos relacionados con la aceptación de este método de aprendizaje en base a distintas actividades que hemos realizado en estos años.

6.2.1 Página web: www.3dneuroanatomy.com.

El contenido completo de la obra obtenida en el periodo de tiempo de 2011-2016 se puede consultar en el enlace:

<http://3dneuroanatomy.com/category/3d-neurosurgical-approaches/>

Se trata de una web que iniciamos en el año 2011 en la que además de servir de portal para publicitar cursos y actividades docentes, hemos desarrollado una revista electrónica de neuroanatomía quirúrgica en formato 3d (anáglifo) que se titula : 3D Neurosurgical Approaches – ISSN 2254-9595. En ella publicamos de modo trimestral artículos anatómicos que tienen en común servir de atlas básico de anatomía para el neurocirujano.

A nivel estadístico, el último análisis que realizamos sobre su aceptación entre usuarios fue en un periodo de cuatro meses (4/6/2014 – 4/6/2014) basado en la aplicación google analytics® y nos aportó estos resultados:

- Usuarios 7187.
- Sesiones 10491.
- Nº de páginas vistas 21550.
- Procedencia de los usuarios:

1. Estados Unidos 25,8%
2. India 5,4%
3. España 5,19%
4. Méjico 4,07%

6.2.2 *Cursos de neuroanatomía 3D*

Una de los métodos de divulgación de la neuroanatomía que más se benefician de la aplicación del formato estereoscópico es la proyección de imágenes y videos con el sistema de luz polarizada en un auditorio. Este es el formato que usamos en los diferentes cursos que organizamos o en los que hemos participado desde el inicio del proyecto.

1. ***3D Neuroanatomy and neurosurgical approaches course.***

Desarrollado anualmente en Alicante desde el año 2014 y desde el año 2015 también en Jaipur (India). Se trata de un curso dirigido a jóvenes neurocirujanos y residentes. Se imparte una sesión teórica de anatomía en formato 3d polarizado en una sala de cine con pantalla panorámica (Fig 84) seguido de una sesión práctica vespertina en el laboratorio de anatomía con discusión de casos y sesiones de demostración anatómica con material impartido en 3d (Fig 85). A este curso asisten 40 participantes cada año de los cuáles el 50% aproximadamente son neurocirujanos extranjeros.

Durante el último curso desarrollado en Alicante se encuestó a los asistentes valorando entre otros aspectos las sesiones

teóricas en formato 3d con una puntuación de 0 a 5. La puntuación media obtenida por las charlas 3D fue de 4,95/5.

2. *Curso anual de abordajes neuroquirúrgicos para residentes de la Sociedad Española de Neurocirugía (SENEC).*

Desde el año 2013 coordinamos los cursos anuales que la SENEK organiza en la Universidad Miguel Hernandez para formación de residentes y neurocirujanos en formación y que a modo de ciclo cubre la anatomía de los abordajes neuroquirúrgicos básicos. Se trata de un curso teórico-práctico que combina presentaciones teóricas y disección en cadáver y que cuenta con 35 alumnos por año. Las ponencias se imparten en formato 2d ó 3d. El hecho de combinar ambos tipos de proyección nos ha parecido una buena forma de medir la valoración por los alumnos de ambos formatos de proyección (2d frente a 3d). Hemos repasado la aceptación de las ponencias 3d año a año, tanto las impartidas por nuestro grupo de Alicante como por otros compañeros que forman parte del grupo de neuroanatomía de la SENEK. Tras cada curso se pasaba una encuesta de satisfacción a los alumnos donde se les pedía en uno de los ítems que valoran del 0-10 cada una de las presentaciones del curso.

Un primer dato a tener en cuenta es el progresivo aumento del porcentaje de sesiones 3D demandadas en estos cursos: 22% (2013), 27% (2014) y 64% (2015). (ver Tabla 1)

El año 2013 (*Anatomy and Surgical Strategies in Intracranial & Skull Base Endoscopic Surgery Course*) fue el primero en el que impartimos charlas en 3D. Aunque sólo fueron 6 ponencias, la

media de puntuación de estas sesiones fue superior a la de las proyectadas en 2D (9,16 frente a 8,33).

En el curso de 2014 (*Microsurgical approaches to the skull base Course*) la valoración media del contenido 3d fue de 9 mientras que el material impartido en 2d obtuvo una media de 8,49.

En el curso realizado en 2015 (*The cerebral substance: sulci, gyri, ventricles and white fibers anatomy Course*) la media obtenida por las presentaciones en 3d fue de 9,39 mientras que las realizadas en 2d obtuvieron una media de 8,4.

La medición objetiva de la efectividad de la estereoscopia en la docencia de la neuroanatomía es una utopía. Sin embargo, los datos aportados por estas encuestas nos permiten demostrar que un grupo amplio de neurocirujanos en formación valoran positivamente el formato 3d en la docencia de la neuroanatomía quirúrgica con respecto al formato clásico en 2d. En los 3 cursos evaluados se alcanza con creces la significación estadística (Ver tabla 2).

TABLA 1. SESIONES 3D EN CURSOS DE NEUROANATOMÍA QUIRÚRGICA DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE NEUROCIRUGIA (SENEC)

Curso	Sesiones 2D (Num/%)	Sesiones 3D (Num/%)
2013, <i>Anatomy and Surgical Strategies in Intracranial & Skull Base Endoscopic Surgery</i>	21 (78%)	6 (22%)
2014, <i>Microsurgical approaches to the skull base</i>	13 (73%)	5 (27%)
2015, <i>The cerebral substance: sulci, gyri, ventricles and white fibers anatomy</i>	5 (36%)	9 (64%)

TABLA 2. RESULTADO ENCUESTAS CURSOS DE NEUROANATOMÍA QUIRÚRGICA DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE NEUROCIRUGIA (SENEC)

Curso	Puntuación media sesiones 2D (\pm DE) n=num encuestas	Puntuación media sesiones 3D (\pm DE) n=num encuestas	p
2013, <i>Anatomy and Surgical Strategies in Intracranial & Skull Base Endoscopic Surgery</i>	8,33 \pm 1,25 n=735	9,16\pm2,15 n=210	<0,001
2014, <i>Microsurgical approaches to the skull base</i>	8,49 \pm 1,35 n=455	9\pm2,25 n=175	<0,001
2015, <i>The cerebral substance: sulci, gyri, ventricles and white fibers anatomy</i>	8,4 \pm 1,45 n=175	9,39\pm2,23 n=315	<0,001



FIG 85.- Proyección de curso de anatomía 3d en pantalla panorámica de cine.



FIG 86.- Práctica en laboratorio con endoscopio 3d durante un curso.

7. DISCUSIÓN

7.1 Utilidad de la estereoscopia en la docencia de la neuroanatomía.

La principal utilidad del uso de la estereoscopia en la docencia de la neuroanatomía la encontramos en la capacidad para hacer más fácilmente comprensibles las relaciones espaciales y la profundidad de las estructuras que estamos visualizando. Dado que la realidad que nos rodea es tridimensional, resulta fácil comprender que, salvo que fuera posible poner ante nuestros ojos un objeto real, la única manera de acercarse a la realidad cuando tratamos de exponer una representación de ese objeto es proyectarlo de una manera que simule su profundidad. La anatomía que debe aprender un neurocirujano ha de ser lo más exacta posible a la real ya que va a necesitar saber que estructuras se encuentran en una región determinada. El cirujano va a precisar moverse por espacios profundos donde ha de conocer la relación espacial entre nervios, vasos, parénquima cerebral o cráneo⁶¹. Cuando usamos el microscopio para operar estamos usando un aparato que nos permite mantener la visión estereoscópica durante el acto quirúrgico. Sin embargo, cuando usamos la endoscopia, actualmente seguimos usando de forma rutinaria ópticas y cámaras que proyectan una imagen bidimensional. Quizás sean estos últimos los casos en los que tenga más sentido enseñar la profundidad de la anatomía antes de entrar en quirófano, ya que la percepción de profundidad que tendremos se va a basar en factores indirectos tales como el conocimiento previo de las estructuras y su localización.

Otra de las ventajas que ofrece la estereoscopia está en el hecho de enseñar una imagen real de la anatomía sin necesidad de hacer uso del cadáver . De este modo evitamos los inconvenientes que esto conlleva: falta de disponibilidad, coste económico de los especímenes y las instalaciones para su uso, incomodidad de tratar con las sustancias tóxicas de preservación del cadáver, impacto psicológico de enfrentarse a una persona fallecida,... 100.

La estereoscopia es útil no solo para representar fotografías, sino que también se beneficiarán de ella los distintos métodos de realidad virtual que van a representar la anatomía como las planificaciones y reconstrucciones 3D de estudios radiológicos, los modelos de realidad virtual, los hologramas, etc..55.

Algunos trabajos ha tratado de evaluar el impacto que la estereoscopia ha tenido como método facilitador en la docencia de la neuroanatomía. Uno de ellos fue llevado a cabo durante la aplicación del proyecto EVA (educational virtual anatomy). Se trataba de un programa informático que proporcionaba a los estudiantes de medicina una herramienta de realidad virtual basada en imágenes radiológicas de diferentes regiones del cuerpo humano transformadas en volúmenes tridimensionales que podían ser manipulados por los mismos estudiantes 41. Se llevó a cabo una encuesta entre los 137 alumnos de medicina de una universidad en la que se aplicó este método de enseñanza. El resultado fue que la gran mayoría de estudiantes consideró este método como mejor que los libros de anatomía o las clases magistrales. Al compararlo con la disección en cadáver un 46 % consideró que era similar o mejor que ésta.

Al evaluar conocimientos, se obtuvo un mejor resultado en los alumnos que habían utilizado la herramienta. 101

7.2 Aportación de la tesis en relación a otros autores y aplicabilidad de la técnica.

El objetivo básico de esta tesis es concentrar en un solo trabajo todas las técnicas necesarias para crear y proyectar estereoscopia en los distintos ámbitos de la anatomía neuroquirúrgica.

Otros trabajos nos hablan de la utilidad de la estereoscopia en la reconstrucción de imágenes radiológicas¹⁰¹⁻¹⁰⁵.

Por otro lado, la utilidad cada vez mayor de la realidad virtual en el campo de la medicina y su docencia se ha acompañado del uso de la visión binocular para poder aumentar la sensación de realidad de las estructuras expuestas ^{36,40,41,106,107}.

Lo que esta tesis aporta como novedad es la descripción paso a paso del material y métodos que precisamos para adquirir imágenes estereoscópicas no solo de la anatomía descriptiva del cerebro, cráneo y columna vertebral sino de la anatomía quirúrgica y de sus abordajes.

Contamos con autores que han descrito las técnicas de adquisición de 3d y su proyección, si bien la mayoría de ellos lo han hecho sobre especímenes expuestos a una simple cámara a una distancia en la que resulta relativamente sencillo realizar fotografía estereoscópica^{41,61,100}.

El trabajo trata de describir cómo hacerlo con diferentes aparatos y a través de diversos abordajes comúnmente utilizados en neurocirugía.

Podríamos establecer dos grupos de abordajes en los que la tesis actual aporta una contribución diferencial sobre otros trabajos:

- *Abordajes microscópicos profundos:*
(Ejemplos en las figuras 66,68,69 y 72)

Abordajes en los que el neurocirujano accede a regiones del cerebro a través de cisuras y cisternas. Estos escenarios van a requerir unas condiciones muy peculiares para poder ser capturados con los métodos de fotografía convencional. Como ya comentamos con anterioridad en el apartado de material y métodos, el uso de una adecuada iluminación y de objetivos con enfoque macro se convierten en herramientas fundamentales. En nuestro trabajo la mayoría de imágenes fueron tomadas con este método gracias a la posibilidad de adaptar la cámara a un sistema de barra deslizante que permitía la movilidad y angulación de la cámara en cualquier posición requerida. Sin embargo, el método teóricamente más sencillo para capturar imágenes de abordajes microquirúrgicos es la captura directa de imagen a través de un microscopio. Sin embargo, los aparatos diseñados para la captura estereoscópica desde el cabezal de los microscopios son muy costosos y su disponibilidad muy limitada¹⁰⁸. Por ello aportamos un método de captura 3d a través de microscopio convencional no antes descrito en la literatura. Como ya explicamos en material y métodos, se trata de usar el cabezal del microscopio como si se tratara de una cámara 2d convencional. Durante la fase de experimentación con este tipo de fotografía hicimos un intento fallido de adquirir las fotografías acoplando una cámara convencional al ocular del microscopio mediante unos adaptadores. Desde un punto de vista teórico, el método resultaba prometedor en el sentido de que si conseguíamos obtener una fotografía de cada ocular cuando el microscopio se encontraba enfocando una disección, el resultado era la obtención de un par de fotos estereoscópicas perfectas. Sin embargo, el tamaño voluminoso de las cámaras convencionales

(con un mínimo de calidad) hacía que el proceso de encajar la cámara en el ocular provocara movimiento en el cabezal y por tanto el consecuente desenfoque de la imagen así como falta de precisión en el deslizamiento del par de fotos estereoscópico. Una vez abandonado este método optamos por utilizar un método que permitiera capturar de modo digital la imagen que se visualizaba desde el microscopio y por tanto utilizar y mover el cabezal como si de una cámara se tratara. Como ya explicamos con anterioridad, la principal desventaja de la técnica en nuestro caso era la dificultad para obtener imágenes en alta resolución por este método.

Es muy probable que la captura y visualización en 3D desde el microscopio quirúrgico sea en pocos años una realidad indispensable y disponible como una característica integrada en estos aparatos.

- *Abordajes endoscópicos transcerebrales y transnasales a la base del cráneo.*

(Ejemplos: figuras 54 y 73)

Se tratan de abordajes cada vez más extendidos en la práctica neuroquirúrgica ya que han conseguido aumentar la visualización directa de las regiones anatómicas donde se encuentra la patología y todo ello con accesos cada vez menos invasivos y estrechos. Por lo tanto, su aprendizaje se ha convertido en un reto para el neurocirujano clásico acostumbrado a trabajar con amplias craneotomías y con la ayuda del microscopio. Estos avances han llevado consigo la necesidad de formar a los nuevos neurocirujanos en estas nuevas

técnicas mostrándoles una anatomía que sigue siendo la misma pero desde una nueva perspectiva. Si ya hemos comentado el beneficio de la visión 3d para cualquier campo de la anatomía, la endoscopia endonasal sería probablemente uno de los campos de la anatomía quirúrgica que más se beneficiaría de esta técnica. Se trabaja en campos profundos donde las estructuras óseas que se atraviesan crean un túnel que alcanza profundidades superiores a los diez centímetros. Sin embargo, y a diferencia del microscopio quirúrgico, la visión actual del neurocirujano con endoscopios convencionales sigue siendo bidimensional. Actualmente se están desarrollando nuevos endoscopios que incorporan una doble óptica para permitir la visión 3d. Estos aparatos no están todavía bien desarrollados y su uso no está todavía extendido. La mayoría de autores que hablan de la estereoscopia aplicada a la endoscopia se limitan a explicar su experiencia y resultado con estos nuevos endoscopios 3d⁶³⁻⁷⁰. A pesar de que el uso del 3d en cirugía no este a nuestro alcance actualmente, el aprendizaje del cirujano debería tener con la estereoscopia una herramienta para integrar la relación espacial entre estructuras. Revisando la literatura científica, el uso de la estereoscopia aplicada a la docencia de esta “nueva anatomía” para el neurocirujano no está desarrollado. En esta tesis se explica el método para adquirir imágenes en 3d con endoscopios convencionales 2d tanto en cirugía como en disecciones para facilitar la docencia de la neuroanatomía y familiarizar así al neurocirujano con una nueva perspectiva quirúrgica antes de enfrentarse a ella en el quirófano.

Por otro lado, la adquisición de imágenes estereoscópicas en el campo de la cirugía espinal, aunque aplica los mismos métodos de adquisición de imágenes que hemos explicado para otros abordajes abiertos, resulta inédito respecto a lo revisado en la literatura.

Otra de las aportaciones singulares de esta tesis ha sido la de añadir la aceptación de la técnica entre los usuarios de las fotografías que se proyectan/publican. Hasta ahora no hemos encontrado trabajos sobre estereoscopia aplicada a neuroanatomía que hayan evaluado el impacto de esta técnica sobre los alumnos. Aunque ya hemos citado que la presente tesis no tiene un fin analítico sino más bien descriptivo resulta importante conocer si se trata de una herramienta útil para los neurocirujanos o estudiantes de medicina que se inician en el aprendizaje de la neuroanatomía. Somos conscientes de que medir la utilidad de esta técnica es casi imposible. Estamos hablando de un método que nunca se aplica de modo aislado sino que siempre supone un complemento a los métodos tradicionales teóricos y gráficos. Si bien es cierto que durante los cursos de anatomía impartidos durante estos años en los que utilizamos la técnica 3D se daba la circunstancia de que se impartían en un porcentaje prácticamente similar, sesiones docentes en formato 2D y otras en formato 3D. Esto ha hecho que la evaluación significativamente superior de las charlas estereoscópicas por parte de los participantes haya servido como un elemento objetivo que podría servir para validar nuestra técnica.

Mas allá del contenido de la tesis, otra aportación novedosa es que la gran mayoría de las figuras se muestran en formato 3d. Dado que va a ser impresa en papel o visualizada como documento Word/pdf en ordenadores convencionales se ha utilizado el método anáglifo para poder ser visualizadas con las gafas que se adjuntan (rojo / azul). Sin

embargo la defensa de la tesis se realizará con proyección en formato 3d polarizado sobre pantalla especial.

7.3 Ventajas y desventajas de las técnicas.

Cuando nos referimos a los **métodos de adquisición de imágenes** estereoscópicas, los mejores son los que usan aparatos que realizan fotografía y video 3d de forma directa sin tener que realizar captura de pares estereoscópicos de forma manual.

Sin embargo, estos aparatos tienen también sus limitaciones. La primera y más importante de las desventajas es el alto coste y escaso desarrollo actual. Asimismo, en el caso de las cámaras fotográficas estereoscópicas, los métodos de enfoque a diferentes distancias (especialmente en las más cortas) no han sido todavía los suficientemente precisos como para generar un efecto 3d cómodo para la vista.

Si nos centramos en los métodos de adquisición de imágenes descritos en esta tesis, vemos que cada técnica tiene sus ventajas e inconvenientes.

Cuando nos referimos a la fotografía de piezas anatómicas aisladas con una distancia favorable desde la cámara, el método de adquisición está bastante estandarizado. Todos los autores comparten el método del colocar una cámara sobre un trípode que disponga de una barra horizontal y que , a su vez disponga de un eje que permita la rotación de la cámara sobre si misma ^{61,100}.

Quizás la variabilidad más notable esté en la distancia que desplazemos la cámara al obtener el par de fotografías. Es bien sabido que a mayor distancia entre las dos fotos mayor es el efecto 3d. Sin

embargo, un exceso de paralelaje entre fotos daría lugar a un efecto incómodo para la visualización. Los autores recomiendan una relación aproximada de 1:30 (siendo 1 la distancia entre fotos y 30 la distancia cámara-objeto)^{4,109}. Un aspecto que puede aumentar el efecto de profundidad en las fotos adquiridas es la iluminación y las sombras. A veces el uso de focos de luz laterales que generan sombras en las piezas anatómicas puede realzar los relieves. Este efecto no causa incomodidad en la visualización del 3d siempre y cuando la iluminación sea similar en ambas capturas.

Cuando hablamos de fotografía 3d sobre abordajes quirúrgicos profundos la adquisición 3d se hace más difícil. El método de captura usando una cámara convencional tiene la ventaja de adquirir fotografías con alta definición. Lo importante es que usemos un trípode o barra horizontal que nos permita que el paralelaje entre las fotos sea correcto. Uno de los principales inconvenientes de este método es introducir la iluminación sobre la estructura profunda que estamos enfocando. La iluminación perfecta sería aquella que se proyectara en el mismo eje que lo hace el enfoque de la cámara. Sin embargo esto no es posible. Hemos probado diferentes métodos: propio flash de la cámara, flash anular adaptado a objetivo y doble LED a modo de barras o “antenas” maleables. Lo que buscamos es minimizar la sombra que se genera cuando el flash incide en las paredes del “túnel de abordaje”.

El método que mejor resultado nos ha dado hasta ahora ha sido el uso de los LED a modo de “antenas” maleables ya que nos permite situar la luz en el punto que deseamos y además, al proyectar la luz de modo continuo antes del disparo, podemos saber antes de la captura cual va a ser la iluminación de la foto. El otro modo de adquirir las fotos en campos profundos que hemos descrito es el uso de un microscopio convencional conectado a un capturador analógico-digital de

imágenes. Este método nos permite capturar la imagen obtenida desde el microscopio pero en formato 2d. Por tanto tenemos que adquirir dos fotos realizando un movimiento horizontal de paralelaje entre foto y foto. La ventaja del método es que nos permite capturar una imagen enfocada e iluminada de un objeto profundo con las ventajas que aporta un microscopio (entre ellas que la luz se proyecte en el mismo eje que el enfoque).

Sin embargo, una de las desventajas es que la calidad de adquisición de la fotografía no era muy alta (600x800) . Por otro lado, el movimiento horizontal de paralelaje entre foto y foto resulta difícil de conseguir de forma manual con un microscopio convencional ya que no se dispone de una barra que mantenga una altura perfecta y que no varíe la distancia al objeto.

Por último, la adquisición de imágenes 3d con endoscopio convencional no da lugar a discutir diferentes métodos que el descrito anteriormente. Se trata de un método complejo en ocasiones ya que no disponemos de barra horizontal que nos permita un movimiento fijo y controlado del endoscopio. Depende más bien de la habilidad en mantener la cámara lo más fija posible entre las dos capturas y que esta no sea mayor que 2-3 mm. En nuestro trabajo solemos tomar varias capturas (más de dos) en serie a lo largo del desplazamiento horizontal. Después en el proceso de edición vamos combinando pares de fotos hasta elegir el par más congruente para obtener el efecto 3d. Cuando se adquieren fotos endoscópicas la tendencia es a mover el endoscopio sólo lateralmente para adquirir la segunda foto y no hacemos la rotación necesaria para volver a enfocar la segunda fotografía en el centro de la imagen (tal y como hacemos con las cámaras) . Aunque hay ocasiones que el abordaje no nos permite hacerlo (por la estrechez o rigidez de las paredes) es recomendable

siempre que sea posible. Para ello, un consejo es colocar una marca en el centro de la pantalla del endoscopio que nos sirva de guía sobre cuál es el centro. Además, como ya explicamos con anterioridad, es útil colocar un hilo horizontal en la pantalla que nos sirva de guía para que los desplazamientos de la cámara sean perfectamente horizontales.

A pesar de todo , las imágenes 3d endoscópicas siempre son más difíciles de adquirir y visualizar. Uno de los inconvenientes añadidos es que la imagen capturada está rodeada del marco circular de las ópticas. De este modo cualquier edición que hagamos sobre la imagen final adquirida (recortes laterales de la foto, desplazamiento a derecha o izquierda ...) va a estar limitado por este fenómeno.

En cuanto a la **metodología de la proyección y visualización** de la estereoscopia hemos de hablar básicamente de dos métodos: el anáglifo y el polarizado. El método anáglifo tiene la ventaja de poder proyectarse prácticamente en cualquier soporte físico: un monitor común, un proyector convencional o un papel. Precisa la utilización de una gafas especiales (rojo -azul) y el proceso de edición de la imagen suele pasar actualmente por sencillas aplicaciones informáticas que procesan y crean una única imagen a partir del par de imágenes estereoscópicas. Sin embargo, este método nos proyecta una imagen con cierta distorsión de los colores y el enfoque visual sobre ellas durante un tiempo prolongado resulta incómodo.

Por el contrario, el método polarizado ofrece la ventaja de proyectar imágenes que mantienen los colores reales del objeto fotografiado y el enfoque resulta mucho más cómodo. Si bien, se trata de un método que requiere un complejo hardware para su proyección o el uso de pantallas de televisión especiales. No podemos proyectar este formato con monitores normales de ordenador ni en formato papel¹⁰⁰.

7.4 Limitaciones de la visión estereoscópica.

Se han descrito efectos adversos asociados a la visión en 3d. En primer lugar hay que señalar que estos efectos se darán en caso de que la visión binocular del individuo esté alterada o en caso de que la imagen proyectada no cumpla con los requisitos ya descritos en la tesis que debe cumplir un correcto formato estereoscópico (disparidad de aspecto/ luz de las imágenes estereoscópicas, mala sincronización del movimiento, desviación vertical, exceso de paralelaje, formato anáglifo...)

Cuando las imágenes que se muestran al espectador no son apropiadas se produce un conflicto en la convergencia y acomodación fisiológicos en ambos ojos.

Como hemos citado, hay condiciones patológicas que hacen al individuo susceptible de percibir mal el 3d: los defectos de refracción (miopía, astigmatismo o hipermetropía), estrabismo, ambliopía (el cerebro sólo recibe la señal de un ojo), déficit de convergencia y acomodación.¹¹⁰

La mala percepción del 3d provocará fatiga visual, dolor ocular y desorientación. Cuando se visualizan videos o películas en 3d, si la señal visual que percibe el individuo no se corresponde con las señales vestibulares provocará mareos y náuseas. Este fenómeno se da con mayor frecuencia en mujeres ya que muestran mayor sensibilidad en la conexión visual-vestibular ¹¹¹.

En cuanto a la visión binocular en niños, se ha comprobado que se adquiere entre los 6 y 12 meses de vida. El desarrollo completo del ojo se adquiere a los 3 años. A partir de esa edad se considera que la visualización de contenidos 3d no es perjudicial. No se ha demostrado

que la visualización 3d aumente el riesgo de crisis epilépticas en pacientes con esta patología¹¹⁰.

Las personas con ambliopía, u ojo vago, tienen una agudeza visual disminuida en un ojo y por tanto han visto mermada su capacidad de ver en tres dimensiones, al igual que las que tienen un solo oído no pueden detectar correctamente de donde provienen los sonidos que escuchan. Si su agudeza visual es muy baja, no se pueden beneficiar de los efectos de la visión en 3D.

Las personas con estrabismo (desviación del alineamiento de un ojo en relación al otro) no son capaces de fijar la mirada de ambos ojos al mismo punto del espacio, lo que ocasiona una visión binocular incorrecta que puede afectar adversamente a la percepción de la profundidad. Esto produce que las personas que sufren este problema no vean imágenes en 3D.

De hecho, diversos estudios sugieren que alrededor del 8% de la población no es capaz de percibir imágenes en 3D, si consideramos este problema más el porcentaje de gente que sufre molestias al consumir contenido en tres dimensiones, a pesar de poder verlo correctamente, podría llegar a suponer un impedimento para la popularización de este tipo de tecnologías ¹¹¹.



8-CONCLUSIONES

La percepción tridimensional en el campo de la cirugía y en particular la neurocirugía permite aumentar la precisión en el manejo de la patología .

La estereoscopia permite capturar esa realidad desde el quirófano o la sala de disección para su divulgación docente en diversos formatos de visualización.

Por tanto, el aprendizaje de la neuroanatomía básica, académica y clínica mediante la proyección de fotografías y videos estereoscópicos puede ser útil como método docente. Esta herramienta gana valor si se usa como complemento a otros métodos ya consolidados. La valoración positiva y significativamente superior de las sesiones de docencia impartidas en formato 3D respecto a las 2D avalan nuestra hipótesis.

Los métodos de captura de imágenes y de proyección estereoscópicos en neuroanatomía, una vez adquiridos los conocimientos teóricos y prácticos necesarios, pueden ser reproducidos en otros centros de enseñanza de neuroanatomía.

Harían falta más trabajos para demostrar con datos objetivos la efectividad de la técnica en la docencia de la neuroanatomía.



9-BIBLIOGRAFIA

1-Guyton AC, Hall JE. O sistema nervoso. In Tratado de fisiologia médica.9.Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1997:672.

2-<http://www.estereoimagens.com.br/sobre3D/principalhtm> InInternet, 2000

3-<http://www.stereoscopy.com/reel3d> In Internet, 2000

4-Ferwerda JG: The World of 3D, ed 2. Borger, The Netherlands: 3D Book Productions, 1990

5-Apuzzo MLJ: The Richard C. Schneider Lecture. New dimensionsof neurosurgery in the realm of high technology: possibilities, practicalities, realities. Neurosurgery 38:625–639, 1996

6-Gorman PJ, Meier AH, Krummel TM: Simulation and virtual reality in surgical education: real or unreal? Arch Surg 134:1203–1208, 1999

7-Hoffman H, Vu D: Virtual reality: teaching tool of the twentyfirstcentury? Acad Med 72:1076–1081, 1997

8-Kosack W. "Der medizinische Papyrus Edwin Smith." The New York Academy of Medicine, Inv. 217; De nueve traducir en jeroglífico: Berlin 2011, Schweizerische Nationalbibliothek, Brunner, Basel 2012,

9-Breitenfeld T, Jurassic MJ, Breitenfeld D. Hippocrates: the forefather ofneurology. Neurol Sci. 2014 Sep;35(9):1349-52. doi: 10.1007/s10072-014-1869-3.Epub 2014 Jul 16. Review.

10-Elhadi AM, Kalb S, Perez-Orribo L, Little AS, Spetzler RF, Preul MC. Thejourney of discovering skull base anatomy in ancient Egypt and the specialinfluence of Alexandria. Neurosurg Focus. 2012 Aug;33(2):E2.

11-Shoja MM, Tubbs RS, Ghabili K, Griessenauer CJ, Balch MW, Cuceu M. The RomanEmpire legacy of Galen (129-200 AD). Childs Nerv Syst. 2015 Jan;31(1):1-5.

12-Nanda A, Khan IS, Apuzzo ML. Renaissance Neurosurgery: Italy's Iconic Contributions. World Neurosurg. 2015 Nov 13. pii: S1878-8750(15)01533-8.

TESIS DOCTORAL

13-Arráez-Aybar LA, Navia-Álvarez P, Fuentes-Redondo T, Bueno-López JL. Thomas Willis, a pioneer in translational research in anatomy (on the 350th anniversary of Cerebri anatome). *J Anat*. 2015 Mar;226(3):289-300.

14-De Carlos JA, Pedraza M. Santiago Ramón y Cajal: The Cajal Institute and the Spanish Histological School. *Anat Rec (Hoboken)*. 2014 Oct;297(10):1785-802.

15-Jones EG. Neuroanatomy: Cajal and after Cajal. *Brain Res Rev*. 2007 Oct;55(2):248-55. Epub 2007 Jun 16. Review.

16-Chang BS, Molnár Z. Practical neuroanatomy teaching in the 21st century. *Ann Neurol*. 2015 Jun;77(6):911-6.

17-Schon F, Hart P, Fernandez C. Is clinical neurology really so difficult? *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2002;72:557-9.

18-Von Staden, H. (1992). The discovery of the body: Human dissection and its cultural contexts in ancient Greece. *The Yale journal of biology and medicine* 65 (3): 223-241.

19-Al-Dabbagh SA. Ibn al-Nafis and the pulmonary circulation. *Lancet*. 1978 May 27;1(8074):1148. PubMed PMID: 77431

20-Nikolaev SM. Experience of the comprehensive study and the outlook for the use of the legacy of Tibetan medicine. *Med Sestra*. 1987 Nov;46(11):54-6.

21-See C. D. O'Malley Andreas Vesalius' Pilgrimage. *Isis* 45:2, 1954.

22-Dyer GS, Thorndike ME. Quidne mortui vivos docent? The evolving purpose of human dissection in medical education. *Acad Med* 2000;75:969-79.

23-Von Ludinghausen M. The goal of dissection in clinically oriented teaching. *Clin Anat* 1992;5:488-9

24-Newell RLM. Follow the royal road: the case for dissection. *Clin Anat* 1995;8:124-7

25-Coulehan JL, Williams PC, Landis D, Naser C. The first patient. reflections and stories about the anatomy cadaver. *Teach Learn Med* 1995;7:61-6

26-Marks SC Jr, Bertman SL. Experiences with learning about death and dying in the undergraduate anatomy curriculum. *J Med Educ* 1980;55(1):48-52.

27-Jones DG. 1997. Reassessing the importance of dissection: A critique and elaboration. *Clin Anat* 10:123-127.

28-McLachlan JC, Bligh J, Bradley P, Searle J. 2004. Teaching anatomy without cadavers. *Med Educ* 38:418-424

- 29-Demiryürek D, Bayramoglu A, Ustacelebi S, . Infectiveagents in fixed human cadavers: a brief review and suggested guidelines. *Anat Rec* 2002;269:194–7
- 30-Altman R. 1998. A curriculum for bioinformatics: The time is ripe. *Bioinformatics* 14:549–550.
- 31-Spitzer VM, Whitlock DG. 1998. The Visible Human dataset: The anatomical platform for human simulation. *Anat Rec (New Anat)* 253:49–57.
- 32-Bankman I, editor. 2000. Handbook of medical imaging. San Diego: Academic Press.
- 33-Rosset A, Spadola L, Ratib O. 2004. OsiriX: An open-source software for navigating in multidimensional DICOM images. *J Digit Imaging* 17:205–216.
- 34-Treleash RB, Nieder GL, Dørup J, Hansen MS. 2000. Going virtual with quicktime VR: New methods and standardized tools for interactive dynamic visualization of anatomical structures. *Anat Rec* 15:64–77.
- 35-Tizon X, Smedby O. 2002. Segmentation with gray-scale connectedness can separate arteries and veins in MRA. *J Magn Reson Imaging* 15:438–445
- 36-Treleash RB. 1998. The virtual anatomy practical: A stereoscopic 3D interactive multimedia computer examination program. *Clin Anat* 11:89–94.
- 37-Mahoney DP: Brain storm. *Computer Graphics World* 21:79–88, July, 1998.
- 38-Satava RM: Virtual reality, telesurgery, and the new world order of medicine. *J Image Guided Surg* 1:12–16, 1995.
- 39-Satava RM: The virtual surgeon. *The Sciences* 38:34–39, 1998.
- 40-Brown PM, Hamilton NM, Denison AR. A novel 3D stereoscopic anatomy tutorial. *Clin Teach*. 2012 Feb;9(1):50-3.
- 41-Henn JS, Lemole GM Jr, Ferreira MA, Gonzalez LF, Schornak M, Preul MC, Spetzler R. Interactive stereoscopic virtual reality: a new tool for neurosurgical education. Technical note. *J Neurosurg*. 2002 Jan;96(1):144-9.
- 42-Blog internet: <http://es.slideshare.net/juaxix1/estereoscopia>. Introducción a la generación de imágenes estereoscópicas. TÉCNICAS Y DISPOSITIVOS DE REALIDAD VIRTUAL MASTER EN INFORMÁTICA GRÁFICA, JUEGOS Y REALIDAD VIRTUAL Marcos García Marcos
- 43-Fernández Rivero, Juan Antonio (2004). Tres dimensiones en la historia de la fotografía : La imagen estereoscópica. Málaga: Miramar.
- 44-Binocular Vision and Stereopsis. Ian P. Howard, Brian J. Rogers. Oxford University

TESIS DOCTORAL

- 45-Welling, William 1978. *Photography in America*, p. 23. 0690014511
- 46-Contributions to the Physiology of Vision—Part the First. On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision. *Phil Trans* pp 371-394
- 47-Booth-Clibborn, Edward. *Paris in 3D - From Stereoscopy to Virtual Reality 1850-2000*. London: Booth-Clibborn, 2000. Press. 1995.
- 48-Darrah, William Culp. *Stereo Views: A History of Stereographs in America and Their Collection*. Gettysburg, PA: Times and News Publishing Co., 1964.
- 49-The American Stereoscope, Oliver Wendell Holmes, *IMAGE, Journal of Photography of the George Eastman House*, Vol. 1, No. 3, Marzo 1952.
- 50-Keystone View Company, Educational Department. *Visual Education, Teacher's Guide to the Keystone "600 set."* Meadville, PA: Keystone View Company, 1922.
- 51-Van Keulen, Wim. *3D Past and Present*. Borger, The Netherlands: 3D Book Productions, 1986.
- 52-Ogram, G.R. *Magical Images – A Handbook of Stereo Photography*. Stafford: UK: Self-Published, 2001.
- 53-Morgan, Hal and Dan Symmes. *Amazing 3D*. Boston – Toronto: Little, Brown & Company, 1982.
- 54-Moltenbrey, Karen. "Atypical Stereo." *Computer Graphics World* July 2003: 44-48.
- 55-Wegman, Edward J. and Jurgen Symanzik. "Immersive Projection Technology for Visual Data Mining." *Journal of Computational and Graphical Statistics*. 11.1 (2002): 163-188
- 56-Bassett DL: *A Stereoscopic Atlas of Human Anatomy*. Portland, OR: Sawyer, 1961
- 57-Chase RA: *A Stereoscopic Atlas of Human Anatomy*, The Bassett and Gruber Legacy. Borger, The Netherlands: 3D Book Productions, 1994.
- 58-Bento RF, Ribas GC, Sanchez TG, et al. *Demonstração Tridimensional da Anatomia Cirúrgica do Osso Temporal*. *Arq Int Otorrinolaringol*. 2000, 4(2):43-47.
- 59-Fernandez-Miranda JC, Rhoton AL Jr, Alvarez-Linera J, Kakizawa Y, Choi C, de Oliveira EP. Three-dimensional microsurgical and tractographic anatomy of the white matter of the human brain. *Neurosurgery*. 2008 Jun;62(6 Suppl 3):989-1026; discussion 1026-8.
- 60-Isolan GR, Rowe R, Al-Mefty O. Microanatomy and surgical approaches to the infratemporal fossa: an anaglyphic three-dimensional stereoscopic printing study. *Skull Base*. 2007 Sep;17(5):285-302
- 61-Ribas GC, Bento RF, Rodrigues AJ Jr. Anaglyphic three-dimensional stereoscopic printing: revival of an old method for anatomical and surgical teaching and reporting. *J Neurosurg*. 2001 Dec;95(6):1057-66
- 62-Rhoton AL Jr: *Cranial Anatomy and Surgical Approaches*. Schaumburg, Lippincott Williams & Wilkins, 2003

- 63-Felisati G, Pipolo C, Maccari A, Cardia A, Revay M, Lasio GB. Transnasal 3D endoscopic skull base surgery: questionnaire-based analysis of the learning curve in 52 procedures. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2013 Aug;270(8):2249-53.
- 64-Felisati G, Lenzi R, Pipolo C, Maccari A, Messina F, Revay M, Lania A, Cardia A, Lasio G. Endoscopic expanded endonasal approach: preliminary experience with the new 3D endoscope. *Acta Otorhinolaryngol Ital*. 2013 Apr;33(2):102-6.
- 65-Zaidi HA, Zehri A, Smith TR, Nakaji P, Laws ER Jr. Efficacy of Three-Dimensional Endoscopy for Ventral Skull Base Pathology: A systematic review of the literature. *World Neurosurg*. 2015 Oct 10. pii: S1878-8750(15)01346-7.
- 66-Singh A, Saraiya R. Three-dimensional endoscopy in sinus surgery. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg*. 2013 Feb;21(1):3-10.
- 67-Ogino-Nishimura E, Nakagawa T, Sakamoto T, Ito J. Efficacy of three-dimensional endoscopy in endonasal surgery. *Auris Nasus Larynx*. 2015 Jun;42(3):203-7.
- 68-Tabaee A, Anand VK, Fraser JF, Brown SM, Singh A, Schwartz TH. Three-dimensional endoscopic pituitary surgery. *Neurosurgery*. 2009 May;64(5 Suppl 2):288-93; discussion 294-5.
- 69-Chen JC, Levy ML, Corber Z, Assifi MM. Concurrent three dimensional neuroendoscopy: initial descriptions of application to clinical practice. *Neurosurg Focus*. 1999 Apr 15;6(4):e12.
- 70-Barkhoudarian G, Del Carmen Becerra Romero A, Laws ER. Evaluation of the 3-dimensional endoscope in transsphenoidal surgery. *Neurosurgery*. 2013 Sep;73(1 Suppl Operative):ons74-8; discussion ons78-9.
- 71-Abarca-Olivas J, Monjas-Cánovas I, López-Álvarez B, Lloret-García J, Sanchez-del Campo J, Gras-Albert JR, Moreno-López P. [Three-dimensional endoscopic endonasal study of skull base anatomy]. *Neurocirugia (Astur)*. 2014 Jan-Feb;25(1):1-7.
- 72-Alvernia JE, Pradilla G, Mertens P, Lanzino G, Tamargo RJ. Latex injection of cadaver heads: technical note. *Neurosurgery*. 2010 Dec;67(2 Suppl Operative):362-7.
- 73- Thiel W. [The preservation of the whole corpse with natural color]. *Ann Anat*. 1992 Jun;174(3):185-95.
- 74- Klingler J Development of a macroscopic preparation of the brain through the process of freezing . *Schweiz Arch Neurol Psychiatr*(1935) 247–256.
- 75-R.S. Tubbs, G. Salter, J. Oakes. Superficial surgical landmarks for the transverse sinus and torcular herophili. *J. Neurosurg*. 93: 279-281, 2000
- 76-S. Gusmao, R. Leal, A. Arantes. Pontos referencias nos accesos cranianos. *Arq Neuropsiquiatr*. 2003; 61 (2-A): 305-308.
- 77-Martinez F., Laxague A., Vida L., et al. Anatomía topográfica del asterion. *Neurocirugia* 2005;16: 441-446.
- 78-Ribas G.C., Ferreira R., Junqueira A. Anaglyphic three-dimensional stereoscopic printing: revivan of an old method for anatomical and sufical teaching and

reporting. *J. Neurosurg* 95:1057-1066, 2001.

79-Ribas G. C., Ribas E.C., Junqueira C. The anterior sylvian point and the suprasylvianoperculum. *Neurosurg Focus* 18 (6b), 2005.

80-Kendir S. , Acar H.I., Comert A., et al. Window anatomy for neurosurgical approaches. *J.Neurosurg*. April 10. 2009

81-Ribas G.C., Yasuda A., Ribas E.C., Nishikuni K. Surgical Anatomy of microneurosurgical sulcalkey points. *Neurosurgery* 59: ONS 177-210. 2006.

82-Nagata S, Rhoton AL Jr, Barry M: Microsurgical anatomy of the choroidal fissure. *Surg Neurol* 30:3-59, 1988

83-Timurkaynak E, Rhoton AL Jr, Barry M: Microsurgical anatomy and operative approaches to the lateral ventricles. *Neurosurgery* 19:685-723, 1986.

84-Wen HT, Rhoton AL Jr, de Oliveira EP: Transchoroidal approach to the third ventricle: An anatomic study of the choroidal fissure and its clinical application. *Neurosurgery* 42:1205-1219, 1998.

85-Harris FS, Rhoton AL Jr: Anatomy of the cavernous sinus: A microsurgical study. *J Neurosurg* 45:169-180, 1976.

86-Housepian EM: Microsurgical anatomy of the orbital apex and principles of transcranial orbital exploration. *Clin Neurosurg* 25:556-573, 1978.

87-Natori Y, Rhoton AL Jr: Microsurgical anatomy of the superior orbital fissure. *Neurosurgery* 36:762-775, 1995.

88-Rhoton AL Jr, Natori Y: *The Orbit and Sellar Region: Microsurgical Anatomy and Operative Approaches*. New York, Thieme Medical, 1996, pp 3-25.

89-Rhoton AL Jr: Cranial anatomy and surgical approaches: the orbit. *Neurosurgery* 51[Suppl 1]:303-334, 2002

90-Fossett DT, Caputy AJ. Approaches to the posterior third ventricle and pineal region. Felicity Edge, editor. *Operative neurosurgical anatomy*. 1st ed. New York: Thieme; 2002. p. 100-106.

91-Giordano M, Wrede KH, Stieglitz LH, Samii M, Lüdemann WO: Identification of venous variants in the pineal region with 3D preoperative computed tomography and magnetic resonance imaging navigation. A statistical study of venous anatomy in living patients. *J Neurosurg* 106:1006-1011, 2007.

92-Kawashima M, Rhoton AL Jr, Matsushima T: Comparison of posterior approaches to the posterior incisural space: Microsurgical anatomy and proposal of a new method, the occipital bi-transtentorial/falcine approach. *Neurosurgery* 51:1208-1221, 2002.

93-Matsushima T, Rhoton AL Jr, de Oliveira EP, Peace D: Microsurgical anatomy of the veins of the posterior fossa. *J Neurosurg* 59:63-105, 1983.

94-Rhoton AL jr: Tentorial incisura. *Neurosurgery [Suppl1]*: S131-S153, 2000.

95-Rhoton AL Jr: The posterior fossa veins. *Neurosurgery* 47 [Suppl 3]:S69-S92, 2000.

96-Rhoton AL Jr: The cerebral veins. *Neurosurgery* 51 [Suppl 4]:S159-S205, 2002.

- 97-Sekhar LN, Fessler RG. Supracerebellar Approach to the Pineal Region Lesions. Timothy Hiscock, editor. Atlas of Neurosurgical Techniques: Brain. 1st ed. New York: Thieme; 2006. p. 549-555.
- 98-Yasargil MG: Paramedian supracerebellar approach, in Yasargil MG (ed): Microneurosurgery: Microsurgical Anatomy of the Basal Cisterns and Vessels of the Brain. New York, Georg Thieme, 1984, vol I, p 242.
- 99-Rhoton AL Jr, Harris FS, Renn WH: Microsurgical anatomy of the sellar region and cavernous sinus. Clin Neurosurg 24:54-85, 1977
- 100-Meneses MS, Cruz AV, Castro IA, Pedrozo AA. [Stereoscopic neuroanatomy: comparative study between anaglyphic and light polarization techniques]. ArqNeuropsiquiatr. 2002 Sep;60(3-B):769-74. Portuguese. PubMed PMID: 12364947.
- 101-Petersson H, Sinkvist D, Wang C, Smedby O. Web-based interactive 3D visualization as a tool for improved anatomy learning. Anat Sci Educ. 2009 Mar-Apr;2(2):61-8
- 102-Temkin B, Acosta E, Malvankar A, Vaidyanath S. An interactive three-dimensional virtual body structures system for anatomical training over the internet. Clin Anat. 2006 Apr;19(3):267-74.
- 103-Drapkin ZA, Lindgren KA, Lopez MJ, Stabio ME. Development and assessment of a new 3D neuroanatomy teaching tool for MRI training. Anat Sci Educ. 2015 Nov 12;8(6):502-9.
- 104-Nowinski WL, Chua BC, Johnson A, Qian G, Poh LE, Yi SH, Bivi A, Nowinska NG. Three-dimensional interactive and stereotactic atlas of head muscles and glands correlated with cranial nerves and surface and sectional neuroanatomy. J Neurosci Methods. 2013 Apr 30;215(1):12-8
- 105-Nowinski WL, Chua BC, Marchenko Y, Puspitsari F, Volkau I, Knopp MV. Three-dimensional reference and stereotactic atlas of human cerebrovasculature from 7Tesla. Neuroimage. 2011 Apr 1;55(3):986-98.
- 106-McMenamin PG, Quayle MR, McHenry CR, Adams JW. The production of anatomical teaching resources using three-dimensional (3D) printing technology. Anat Sci Educ. 2014 Nov-Dec;7(6):479-86.
- 107-Brewer DN, Wilson TD, Eagleson R, de Ribaupierre S. Evaluation of neuroanatomical training using a 3D visual reality model. Stud Health Technol Inform. 2012;173:85-91.
- 108-Barone DG, Ban VS, Kirollos RW, Trivedi RA, Bulters DO, Ribas GC, Santarius T. Alternative cost-effective method to record 3D intra-operative images: a technical note. Br J Neurosurg. 2014 Dec;28(6):819-20.
- 109-Wolffgram DE: Aventuras em 3D. Sao Paulo: Berkeley Brasil Editora, 1993.
- 110- American Optometric Association "3D in the classroom"*Public Health report* United States of America, 2011. Retrieved on 5 May 2013.
- 111-Solimini AG. Are there side effects to watching 3D movies? A prospective crossover observational study on visually induced motion sickness. PLoS One. 2013;8(2):e56160.



10-ANEXO

10.1 REFERENCIA FUNDAMENTAL NUM 1.

- **García-Garrigós E, Arenas-Jiménez JJ, Monjas-Cánovas I, Abarca-Olivas J, Cortés-Vela JJ, De La Hoz-Rosa J, Guirau-Rubio MD. Transsphenoidal Approach in Endoscopic Endonasal Surgery for Skull Base Lesions: What Radiologists and Surgeons Need to Know. Radiographics. (Q2) 2015 Jul-Aug;35(4):1170-85.**

Doi:10.1148/rg.2015140105. Review. PubMed PMID: 26046941.

ABSTRACT

In the last decades, endoscopic endonasal transsphenoidal surgery has become the most popular option to treat lesions of the skull base by neurosurgeons and otolaryngologists, with minimal invasiveness and lower incidence of complications and morbi-mortality compared with traditional approaches.

Relationships of the sphenoid bone with the nasal cavity below and the pituitary gland above have led to the transsphenoidal route to be the surgical approach of choice for most sellar tumors. More recently, modifications of the transsphenoidal surgery have widened the indications by developing extended approaches, with the use of different corridors leading to specific target areas, from the crista galli to the spinomedullary junction.

Computer-assisted surgery (CAS) is an evolving technology that allows real-time anatomic navigation on triplanar radiologic images during the course of endoscopic surgical procedures by linking preoperative radiological images and intraoperative endoscopic view, avoiding the damage to vital structures. Preoperative computed tomography (CT) is the preferred technique to show bone landmarks and vascular structures. Radiologists play an important role in the surgery planning by reporting the extension of the sphenoidal pneumatization, description of recesses and septations of the sinus and all the other relevant anatomic variants.

A good understanding of the relationships of sphenoid bone and skull base structures, anatomic variants and image-guidance techniques based on neuronavigation, are essential to prevent surgical complications and to achieve an effective treatment of skull base lesions by endoscopic endonasal transsphenoidal approach.

SUMMATION

In this article, we review anatomy and relationships of sphenoid bone and skull base structures with cadaver head, endoscopic and CT-images correlation, explain the neuronavigation CT protocol technique and intraoperative navigation systems, discuss the surgical techniques and approaches, their indications and challenges and finally, emphasize anatomic aspects which increase the risk of complications during endoscopic endonasal transsphenoidal surgery.

INTRODUCTION

Since first report of successful endonasal endoscopic resection of pituitary adenomas by Jankowski et al. (1) in 1992, endoscopic endonasal surgery has become the most popular option to treat lesions of the skull base by neurosurgeons and otolaryngologists (2-6).

CME1c{The use of the endoscope in transsphenoidal approaches represents a significant advantage in the management of skull base lesions with minimal invasiveness, incidence of complications, less traumatism of important anatomic structures and lower morbidity compared with (open) traditional approaches (7-10)}. It offers a panoramic view, providing exquisite visualization of the surgical route and a rapid and direct access to sphenoidal sinuses, clivus, sellar and parasellar areas, as well as better visualization of the internal carotid arteries, optic nerve and chiasm, minimizing the chances of catastrophic complications (11). This approach allows close inspection, differentiation between lesion and normal tissues and the use of extended routes, facilitating the complete resection of the lesion (12-14).

Factors affecting surgical results and complications include anatomic variants, operator experience and technological developments being anatomical disorientation during surgery one of the major limitations of this approach. These disadvantages can be overcome by professional skills of the endoscopic technique, extensive knowledge of the skull base anatomy, training in experimental endoscopic surgery of the cadaver head and the use of image guidance during surgery (15-16). Fluoroscopy was formerly used as the image guidance technique, but nowadays CT or magnetic resonance (MR) imaging with multiplanar reconstructions are used preoperatively because of their anatomic resolution. State of art multidetector CT and

MRI permit obtaining isotropic multiplanar high resolution thin slice images of the head with optimal vascular and tumoral enhancement if necessary (17).

In this article, we review anatomy and relationships of sphenoid bone and skull base structures with cadaver head, endoscopic and CT-images correlation, explain the neuronavigation CT protocol technique and intraoperative navigation systems, discuss the surgical techniques and approaches, their indications and challenges and finally, emphasize anatomic aspects which increase the risk of complications during endoscopic endonasal transsphenoidal surgery.

SPHENOID BONE ANATOMY

The sphenoid bone is the main skeletal underpinning of the central skull base and is architecturally complex (18). It has a centrally located body containing the sella turcica above and sphenoid sinus below, four lateral extensions (lesser and greater sphenoid wings) and two inferior projections (pterygoid processes).

The sella turcica, a saddle-shaped depression in the upper portion of the body of sphenoid bone, represents the most conspicuous landmark of the central skull base in the superior view (19). The sella is bound anteriorly by the tuberculum sellae and posteriorly by the dorsum sellae, and contains the pituitary gland. Just anterior to the tuberculum sellae is a shallow groove, the chiasmatic sulcus. Above and anterior to the chiasmatic sulcus is the planum sphenoidale. The sella is surrounded by 4 bony projections, the anterior and posterior clinoid processes. The anterior clinoid processes are located along the medial margins of the lesser wings. The posterior clinoid processes are situated superolateral to the dorsum sellae. The dorsum sellae is

contiguous inferior and posteriorly with the clivus through a synchondrosis (Fig 1) (20).

The sphenoid sinus is a mucosa-lined, variably pneumatized posterior extension of the paranasal sinuses. For practical purposes, it is considered intrinsic to the sphenoid bone and is surrounded by numerous neurovascular structures that may underlie prominences and recesses inside the sinus, such as the sella, internal carotid arteries, and nerves such as vidian, optic and trigeminal divisions. The sinus is bordered by the ethmoidal air cells anteriorly, the clivus posteriorly, the cavernous sinuses and cavernous internal carotid arteries laterally, the pituitary fossa and planum sphenoidale superiorly and the choana inferiorly (Fig 2) (19, 21).

Sphenoid bone has a number of important neurovascular canals. **CME2b**{The superior orbital fissure, through which the oculomotor, trochlear, abducens, and ophthalmic nerves pass, is formed on its inferior and lateral margins by the greater wing and on its superior margin by the lesser wing (19). } The optic canals are situated above and separated from the superomedial margin of the superior orbital fissure by the optic strut, a bridge of bone extending from the lower margin of the base of the anterior clinoid process to the body of the sphenoid. The pterygoid (vidian) canal courses from anterior to posterior through the junction of the pterygoid process and the sphenoid body. The foramen rotundum and ovale, which contains the V2 and V3 branches of the trigeminal nerve respectively, and foramen spinosum are located from anterior to posterior, near the junction of the body and greater wing (Fig 3) (19).

IMAGING TECHNIQUE AND CAS SYSTEM

TP[Computer-assisted surgery (CAS) is an evolving technology that is useful for improving localization in minimally invasive procedures. During the last decades, the expanding indications and availability of CAS in endoscopic endonasal surgery have resulted in its widespread adoption, expanding the use of transnasal approaches for a variety of intracranial lesions (16).]

Computer-guided neuronavigation systems, first introduced by Kato et al. (22) in 1991, enable operation by using preoperatively acquired 3D image data. Modern systems allow navigation to be based off CT or MR images. MR imaging compared to CT has the advantage of higher resolution for soft tissue, but provides less information about bony structures, which are anatomic landmarks traditionally used for guidance of endoscopic surgery. For this reason, CT is the preferred technique to detect and delineate bony landmarks and anatomic variants that facilitate the safe access into sphenoid sinus to the surgeon (17). Moreover, soft-tissue window, specially when contrast media agent is used, permit identification of vascular structures and tumor delimitation (17, 23). Image guidance based on neuronavigation is also essential in cases where the patient's anatomy has been altered by disease or previous surgery (24, 25).

Our CT-imaging neuronavigation protocol consists of a series of contiguous 1.0 mm axial sections with a 512 x 512 pixel matrix, without gantry tilt, covering from the maxillary bone (including the hard palate) up to the top of the head. The tip of the nose, ears and all fiducial markers (if present) must be included. Contrast agents may be injected before scanning. There is not a defined standard protocol of contrast material injection protocols may vary from one institution to another, according to number of detectors of the scanner, iodine

concentration, rate of delivery and individual radiologist preferences. In our institution for a standard patient we prefer 70 mL of intravenous Iodinated contrast material at a rate of 2 mL/second (Iomeprol 400 mgI/ml), 1 minute delay after beginning of the injection to achieve proper enhancement of cavernous sinus and internal carotid arteries together with adequate differentiation between normal and pathologic tissues.

Reconstructed MPR sections in all 3 planes should always be provided by the radiologist.

There are five basic components in a CAS system: a computer workstation, the software, a monitor for image display, a tracking system and an instrument or instruments to be tracked, such as aspirators, debridors and drills among others (Fig 4) (25).

The correlation of the intraoperative registration with the preoperative CT scan provides the surgeon with a three-dimensional visual road map revealing the position of surgical instruments in relation to the patient's anatomy. The screen shows real-time endoscopic view demonstrating the anatomy within the surgical field, and the current axial, coronal and sagittal CT correlation provided by the CAS system for that point and surrounding structures, improving surgeon's anatomic perspective and resulting in a lower occurrence of complications and more complete surgical procedures (Fig 5) (16, 25).

TRANSSPHENOIDAL APPROACH AND SURGICAL TECHNIQUE

TP[Transsphenoidal route has become the standard endoscopic approach for the surgical treatment of most intrasellar tumors. The versatility of the transsphenoidal approach is based on solid foundations: it is the least nasal traumatic route to the sella turcica, avoids brain retraction and offers an improved vision of the surgical

field. As a result of these advantages it has a lower morbidity and mortality rates when compared with transcranial procedures (26).]This approach is specially recommended for lesions in children, since it is essential to keep anatomical and functional integrity to ensure their normal growth and nasoesphenoidal ventilation (27).

TP[More recently, modifications of the transsphenoidal surgery have developed extended approaches with the use of different corridors to specific target areas, from the crista galli to the spinomedullary junction (Fig 6) (26),providing a widening of the indications of this approach further than for merely intrasellar lesions, reaching a great variability of central skull base lesions], some of them are referred in table 1 (15, 27-32). They permit entering the skull base through the cribriform plate, planum ethmoidale and sphenoidale, tuberculum and dorsum sellae, clivus, craniovertebral junction and anterior portion of the foramen magnum (Fig 7) (26, 30), giving rise to a varied terminology in the surgical literature according to the entering route (transcribiform, transplanum, transtuberculum, supradiaphragmatic, transclival approaches among others). Also, for off-midline skull base lesions, lateral approaches have been developed such as ethmoid-pterygoid-sphenoidal(33).

Extension of the lesion and its characteristics represent challenges in transsphenoidal surgery, such as significant suprasellar extension with small hiatus of diaphragma sellae, lateral and retrosellar extension, brain invasion with edema, firm tumor consistency, vasospasm of circle of Willis arteries and encasement or invasion of the optic pathways and the optic foramina. Sinusitis is considered a relative contraindication to transsphenoidal approach because of possible transcranial spread of infection (15).

Standard technique includes two phases; nasosphenoidal stage and sellar stage. The aim in the nasosphenoidal phase is to create an adequate surgical pathway in the posterior nasal cavity, saving the sinonasal anatomy and function. After introducing the endoscope into the nasal cavity, the head of the middle turbinate is dislocated laterally to widen the space between the turbinate and the nasal septum. As the endoscope advances posteriorly, it reaches the choana. A wide sphenoidotomy is performed after identifying the sphenoid ostium, usually located along the sphenoidethmoidal recess, approximately 1.5 cm above the roof of the choana and posterior to the superior turbinate. Caution must be used in the inferolateral direction, where the sphenopalatine artery and its major branches lie, to avoid arterial damage and subsequent bleeding (Fig 8). This is followed by removal of the inter and intrasinus septae and exposure of clivus, sellar floor, carotid prominences, opticocarotid recesses and planum sphenoidale (Fig 9). **CME3d**{During the sellar phase, the sellar floor is removed, dura mater is opened and the lesion removed. The sellar reconstruction is performed with autologous/heterologous tissues grafts (such as a fat, muscle, fascia, mucopericardium, mucoperiosteum, pedicled flaps) or synthetic materials (such as oxidized cellulose, spongostan, tissue glue) to fill the resection site and make watertight seal, and finally the endoscope is pulled out (29, 34) }.

In contrast with the standard endoscopic approach, in which the sphenoidal sinus in the majority of cases provides the surgical space to gain access to the sellar region, the extended approaches require the creation of a wider surgical corridor to expose and work in the different areas around the sella. The creation of such surgical corridors requires removal of other nasal and paranasal structures according to the different surgical target areas (planum sphenoidale, olfactory

groove, clivus, craniovertebral junction and anterior portion of the foramen magnum) (26, 30).

ANATOMIC VARIANTS

Extension of the pneumatization and specific anatomic variants in the sphenoid bone greatly determine the endonasal transsphenoidal approach. Radiologists should report all these variants in order to limit intra and postoperative complications.

The traditional classification by Hamberger (35) and Hammer (36) describes three different types of pneumatization of the sphenoid in adults, based on the proximity of the aerated cavity to the sellar floor. In conchal type, pneumatization does not reach into the body of sphenoid bone. Its anterior wall is separated from the sella turcica by approximately 10 mm of cancellous bone. In presellar type, pneumatization is situated in the anterior sphenoid bone and does not penetrate beyond the anterior sellar wall. **TP[CME4d**{Finally, sellar pneumatization is the most common type in the adult, appearing in approximately 76% of the people (19). In this type, the sphenoid sinus extends posteriorly below the sella (incomplete type) or more often to the posterior clival margin (complete type).} This latter configuration is the most favorable for a transsphenoidal surgery because the anterior sellar wall and sellar floor typically measure less than 1mm in thickness.]} The presellar and conchal types of pneumatization are less common and would require the drilling of the bone to reach the sellar floor (Fig 10).

A broader classification system using the same principle which is also used in the surgical literature has been suggested by Guldner et al. (37) that includes type I or nonpneumatization type (seen in <1%); type II or presellar type (posterior sinus wall anterior to the anterior

wall of sella; seen in 7%); type III or sellar type (pneumatization extending between anterior and posterior wall of the sella; seen in 38%); and type IV or postsellar type (pneumatization extends posterior to the posterior wall of the sella; seen in 38%).

New more specific classifications have been developed taking into account the extensions of the sphenoidal sinus pneumatization, that play an important role in facilitating extended approaches by providing natural corridors to access to skull base lesions, and producing recesses and bony prominences of neurovascular structures, separated by a thin layer of bone or sometimes dehiscent (Fig 11).

The clival type of sinus is divided into dorsum, subdorsum, occipital and dorsum-occipital types, depending on the direction of pneumatization, and may facilitate access to the dorsum, posterior clinoids, petrous apex, the entire clivus down to the anterior lip of the foramen magnum and odontoid process, and the anterior brainstem and adjacent cisterns (Fig 12) (21).

The lateral type of sphenoid sinus, divided into greater wing, pterygoid process and full lateral types, permits approaches to the cavernous sinus, middle fossa and petrous apex (21). In lateral pneumatization, the lateral wall of the sinus extends laterally beyond a line which crosses the medial edge of the foramen rotundum and vidian canal (VR line) into the greater wing, inferiorly into pterygoid processes or both (full lateral type) (Fig 13). In this type of pneumatization (in approximately 37-39% of patients), maxillary and vidian nerves may bulge into the lateral wall of the sinus and sometimes are completely surrounded by air (38, 39).

CME6a{In the lesser wing type, the sinus pneumatizes through the optic strut and into the anterior clinoid process forming the medial

and lateral opticocarotid recesses (Fig 9, 13b) (38).} This provides an easier surgical corridor to the lateral suprasellar area (21), but also leads to the possibility of bulging or dehiscence of optic nerve, seen in approximately 17%-23% of patients (39-40) (Fig 11b, 13c). DeLano et al. (41) classified the relationship of optic canal to sphenoid and ethmoid sinuses into 4 types according to the degree of protrusion. Although there is no statistical correlation between clinoid pneumatization and protrusion of the carotid canal into the sphenoid sinus (38), recognition of this variant can avoid severe hemorrhage during endoscopic surgery.

Ethmoidal recess is an anterolateral protrusion of the sphenoidal sinus pneumatization, facing the maxillary sinus and allowing the access to sphenoid sinus directly from the maxillary sinus (Fig 14a) (21).

Septal recess is formed by the pneumatization of the posterior portion of the nasal septum or vomer, also known as sphenovomerine bulla (Fig 14b). Depending of its size, it can narrow the sphenothmoidal recesses and make surgical access to the sphenoid sinus ostium difficult (42).

We must be specially aware of the presence of the Onodi cells (which can be found in up to 8 to 14%).CME7b{These aberrant posterior ethmoid cells develop lateral and/or superiorly to the sphenoid sinus, pushing the sinus inferiorly (43).} It is important to identify them due to their direct relation to the optic nerve and internal carotid artery to avoid its damage (Fig 3a, Fig. 15). On coronal CT, a helpful clue to the presence of these air cells is a horizontal or cruciform septum. The horizontal septation represents downward displacement of the anterior wall of the sphenoid sinus by the superiorly overriding Onodi cell and the cruciform configuration

results from bilateral Onodi cells, with the sphenoid septum transecting the sphenoid sinus wall(42).The Onodicells may also extend into the anterior clinoid processes, with pneumatization of these structures seen in 6%-13% of cases (44-45). **TP**[Disorientation during surgery due to Onodi cells can be catastrophic because behind their posterior wall the surgeon finds the middle cranial fossa instead of the expected sphenoid sinus in the usual anatomy.]

Of major importance is the pattern of intrasphenoidal septation, the location and the number of intrasinus septae. The sphenoid sinus is divided into two cavities by the intersinus septum or subdivided by accessory septa, composing a multisepta sphenoid sinus. **CME9d**{Up to 50 to 70% of people have a sphenoid septum that insert off midline and often, these septae attach to the carotid canal (Fig 16). In these cases care should be taken when removing the septum to prevent cavernous carotid artery injury (42,46).} Horizontal intrasphenoidal septations can also appear as a cruciform pattern mimicking Onodi cells on coronal CT images. Lack of continuation of posterior ethmoid cells with the sphenoid sinus about the septation on axial CT images is the clue to recognize them.

Apart from anatomic variants, when evaluating presurgical studies in patients with pituitary adenomas, radiologist should use the Knosp-Steiner classification of cavernous sinus invasion . It is based on the extent of lateral tumor growth in relationship to a tangential line drawn between the intracavernous and supracavernous internal carotid arteries on coronal MR images. The system describes 5 grades of invasion, ranging from 0 to 4, as depicted in Figure 17. Study data from Knosp et al. (47) show that identification of tumor passing the intercarotid line (grade 2 and above) on coronal image is highly predictive of cavernous sinus invasion identified at surgery.

Conversely, patients with grade 0 or 1 displayed no definitive cavernous sinus invasion at surgery. Moreover, Knosp et al. noted that the degree of invasion was directly related to the tumor size.

Finally, other common anatomic endonasal variations (septal deviation, spina septi, concha bullosa) and inflammatory conditions (polyps) could pose difficulties in nasal phase of the endoscopic surgery (31).

POSTOPERATIVE IMAGING AND COMPLICATIONS

Imaging findings after transsphenoidal surgery depend on numerous factors including type of surgery route, size and extension of the lesion before surgery, type, volume and time of resorption of implanted materials. Changes in anatomical conditions, blood products together with packing and hemostatic materials represent difficulties in the evaluation of residual lesions and some complications in the early postsurgical period (48).

Postoperative CT findings show a transient sinus opacification by soft tissue density representing blood, swollen mucosa and debris, surgical field hematoma, gas bubbles and bony defects (49).

MR imaging following transsphenoidal surgery shows postoperative hemorrhage, fluid collection and filling materials implanted, which can present peripheral rim of enhancement caused by surrounding granulation tissue. Hemostatic materials can be seen for only a short period of time after the procedure, while others, such as fat or muscle with fascia, may be present for as long as even 10 years after the procedure (48).

TP[Complications of the endoscopic transsphenoidal surgery can be classified in nasal, CSF leakage, infectious, endocrinological complications, ophtalmic and vascular injury and intracranial complications (Table 2) (7, 26,40-59). In the literature, the complication rates range from 10 to 26.3% and surgery-related mortality has been reported from 0 to 0.68% (53-55).]

Rhinological complications are frequent and include from mild postoperative sinus congestion to severe life threatening epistaxis. Kilty et al. (53) have reported a 29.6% incidence of extracranial complications following endoscopic transsphenoidal sellar surgery, with the majority of them being prolonged nasal crusting (10.8%) and synechiae formation (8.8%). Bleeding during the nasal phase of the surgery hinders visibility, hence may cause delays, an improper performance of the operation or even surgical complications. Uncomplicated mucosal bleeding from capillary is more common, but relevant bleeding mainly from posterior septal branches of sphenopalatine artery can occur in 0.7-7% of cases (7, 50). Hyposmia-anosmia can also appear due to the damage of the olfactory nerve branches, which are located along the whole superior turbinate and superior half of the middle turbinate.

CME10a{The most common complication at the sellar stage is intraoperative CSF leakage, whose frequency and duration increase in patients who had previous surgery or in extended transsphenoidal surgical approaches, with rates ranging from 1.5% to 6.4% (26).} Extensive pneumoencephalus of late onset can be seen in this complication (Fig 18).

Infectious complications include sinusitis and meningitis. In the literature, the rate of sinusitis and meningitis vary between 0.5%-5.7% and 0.4%-2%, respectively ~~respectively~~ with low mortality (50).On

imaging studies meningeal enhancement usually can be seen in meningitis.

Complications related to glandular injury are markedly transient in the beginning and must be managed by the endocrinologist. Temporary pituitary dysfunction and diabetes insipidus might occur after simple manipulation of the pituitary gland and/or other skull base structures (54). Syndrome of inappropriate secretion of antidiuretic hormone can also appear.

Visual disturbances including vision loss and visual field defects can be caused by excessive manipulation of the optic nerves or chiasm when operating lesions with significant suprasellar extension (55).

The majority of vascular complications associated with the sellar endoscopic stage involve suprasellar vascular injuries including intracerebral hemorrhage (Fig 19), midbrain stroke, mesencephalic hemorrhage, posterior cerebral artery laceration and internal carotid artery injury. The intraoperative internal carotid injury rates from 0.16%-1%. In these cases, surgeon should pause the surgery and conventional angiography and neurovascular management should immediately be performed (7, 56-58).

Finally, other rare complications of the surgery are reported such as coma, cranial nerve palsies and mortality between 0 % - 1% (59).

CONCLUSIONS

Endoscopic endonasal transsphenoidal surgery has grown rapidly in the last decades as a therapeutic modality for skull base lesions, and extended approaches of the technique have been developed widening their indications.

Image-guided surgery allows real-time anatomic navigation on triplanar radiologic images during the course of surgical procedures while safely avoiding damage to important neurovascular structures.

Preoperative imaging techniques with neuronavigation protocol and multiplanar reconstruction provide an accurate depiction of tumor extension, associated bone changes and anatomic variants. Radiologist must pay attention to the extension of the sphenoidal pneumatization, description of recesses and septations of the sinus and all the other relevant anatomic variants that are crucial for a safe and effective surgical treatment of skull base lesions by the endonasal route. Knowledge of the surgical technique and understanding the role of imaging in the preoperative workup of these patients are essential for all radiologists dealing with these patients.

To achieve better outcome, well-coordinated teamwork formed by otorhinolaryngologists, neurosurgeons and radiologists, specialized in endoscopic surgery and skull base lesions, is considered a prerequisite for successful transsphenoidal surgery.

REFERENCES

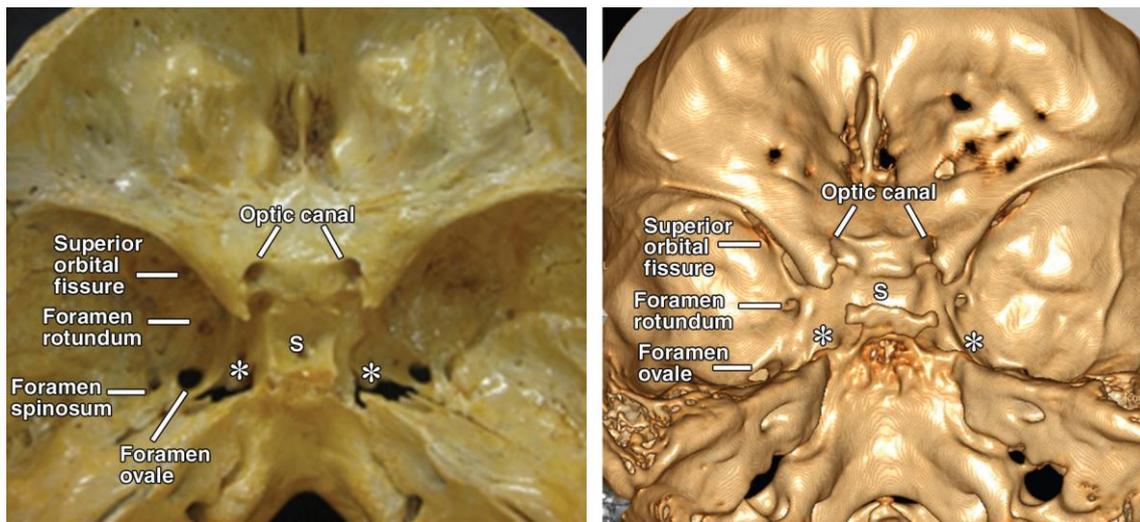
1. Jankowski R, Auque J, Simon C, Marchal JC, Hepner H, Wayoff V. Endoscopic pituitary tumor surgery. *Laryngoscope* 1992;102(2):198–202.
2. Cappabianca P, Alfieri A, de Divitiis E. Endoscopic endonasal transsphenoidal approach to the sella: towards functional endoscopic pituitary surgery (FEPs). *Minim Invasive Neurosurg* 1998; 41(2):66–73.
3. Cappabianca P, de Divitiis E. Endoscopy and transsphenoidal surgery. *Neurosurgery* 2004; 54(5):1043–48; discussions 1048–50.
4. de Divitiis E, Cappabianca P. Endoscopic endonasal transsphenoidal surgery. *Adv Tech Stand Neurosurg* 2002; 27:137–77.
5. Jho HD, Carrau RL. Endoscopic endonasal transsphenoidal surgery: experience with 50 patients. *J Neurosurg* 1997; 87 (1):44–51
6. Netea-Maier RT, van Lindert EJ, den Heijer M et al. Transsphenoidal pituitary surgery via the endoscopic technique: results in 35 consecutive patients with Cushing's disease. *Eur J Endocrinol* 2006; 154(5):675–84 .

7. Cappabianca P, Cavallo LM, Colao A, de Divitiis E. Surgical complications associated with the endoscopic endonasal transsphenoidal approach for pituitary adenomas. *J Neurosurg* 2002; 97(2): 293–8.
8. Dusick JR, Esposito F, Mattozo CA, Chaloner C, McArthur DL, Kelly DF. Endonasal transsphenoidal surgery: the patient's perspective—survey results from 259 patients. *Surg Neurol* 2006;65 (4):332–41, discussion 341–2
9. Roux FX, Page P, Nataf F, Devaux B, Djian MC, Joly LM. The endonasal approach to pituitary adenomas: experience in 105 procedures. *Ann Endocrinol* 2002; 63(3):187–192
10. White DR, Sonnenburg RE, Ewend MG, Senior BA. Safety of minimally invasive pituitary surgery (MIPS) compared with a traditional approach. *Laryngoscope* 2004;114(11):1945–1948.
11. Jiang WH, Xiao JY, Zhao SP, Xie ZH, Zhang H. Resection of extensive sellar tumor with extended endoscopic transseptal transsphenoidal approach. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 2007; 264 (11):1301-8.
12. Cusimano MD, Fenton RS. The technique for endoscopic pituitary tumor removal. *Neurosurg Focus* 1996;15:1(1)e1; discussion 1p following e3.
13. Jarrahy R, Berci G, Shahinian HK. Assessment of the efficacy of endoscopy in pituitary adenoma resection. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 2000;126(12):1487–90.
14. Aust MR, McCarrey TV, Atkinson J. Transnasal endoscopic approach to the sella turcica. *Am J Rhinol* 1998; 12(4):283–7.
15. Yadav Y R, Sachdev S, Parihar V, Namdev H, Bhatele P R. Endoscopic endonasal trans-sphenoid surgery of pituitary adenoma. *J Neurosci Rural Pract* 2012;3(3):328-37.
16. Kacker A, Tabae A, Anand V. Computer-assisted surgical navigation in revision endoscopic sinus surgery. *Otolaryngol Clin North Am.* 2005 Jun;38(3):473-82, vi.
17. Ulmer S, Schulz E, Moeller B et al. Radiation dose of the lens in trans-sphenoidal pituitary surgery: pros and cons of a conventional setup using fluoroscopic guidance and CT-based neuronavigation. *AJNR Am J Neuroradiol* 2007;28(8):1559-64.
18. Laine FJ, Nadel L, Braun IF. CT and MR imaging of the central skull base. Part 1: Techniques, embryologic development and anatomy. *Radiographics* 1990. 10(4):591-602.
19. Rhoton AL Jr. The sellar region. *Neurosurgery* 2002; 51(4suppl):S335-74.
20. Chapman PR, Bag AK, Tubbs RS, Gohlke P. Practical anatomy of the central skull base region. *Semin Ultrasound CT MR.* 2013;34(5):381-92.
21. Wang J, Bidari S, Inoue K, Yang H, Rhoton A Jr. Extensions of the sphenoid sinus: a new classification. *Neurosurgery.* 2010 Apr;66(4):797-816.
22. Kato A, Yoshimine T, Hayakawa T, et al. A frameless, armless navigational system for computer-assisted neurosurgery: technical note. *J Neurosurg* 1991;74(5):845–49.
23. Choudhri AF, Parmar HA, Morales RE, Gandhi D. Lesions of the skull base: imaging for diagnosis and treatment. *Otolaryngol Clin North Am.* 2012 Dec;45(6):1385-404.
24. Tewfik MA, Wormald PJ. Ten pearls for safe endoscopic sinus surgery. *Otolaryngol Clin North Am* 2010;43(4):933-44.
25. Wise SK, DelGaudio JM. Computer-aided surgery of the paranasal sinuses and skull base. *Expert Rev Med Devices* 2005;2(4):395-408.

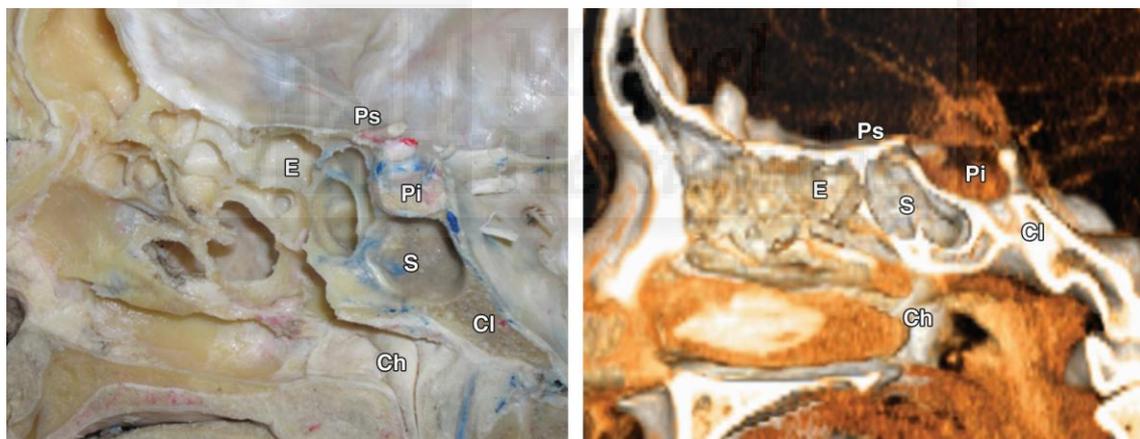
26. Cavallo LM, Messina A, Cappabianca P et al. Endoscopic endonasal surgery of the midline skull base: anatomical study and clinical considerations. *Neurosurg Focus* 2005. Jul;19(1):E2 .
27. de Divitiis E, Cappabianca P, Gangemi M, Cavallo LM. The role of the endoscopic transsphenoidal approach in pediatric neurosurgery. *Childs Nerv Syst* 2000;16(10-11):692-6.
28. Cappabianca P, Alfieri A, Colao A, Cavallo LM, Fusco M, Peca C, Lombardi G, de Divitiis E, Endoscopic endonasal transsphenoidal surgery in recurrent and residual pituitary adenomas: technical note. *Minim Invasive Neurosurg* 2000;43(1):38-43.
29. Tataranu L , Gorgan MR , Ciubotaru V et al. Endoscopic endonasal transsphenoidal approach in the management of sellar and parasellar lesions: indications and standard surgical technique (part I). *Romanian Neurosurgery* 2010;17(1):52-63.
30. Lindley T, Greenlee JD, Teo C Minimally Invasive Surgery (Endonasal) for Anterior Fossa and Sellar Tumors. *Neurosurg Clin N Am.* 2010; 21(4): 607-20
31. Van Lindert EJ, Ingels K, Mylanus E, Grotenhuis JA. Variations of endonasal anatomy: relevance for the endoscopic endonasal transsphenoidal approach. *Acta Neurochir* 2010;152(6):1015-20.
32. Komotar RJ, Starke RM, Raper DM, Anand VK, Schwartz TH. Endoscopic endonasal compared with microscopic transsphenoidal and open transcranial resection of craniopharyngiomas. *World Neurosurg.* 2012;77(2):329-41.
33. Arbolay OL, González JG, González RH, Gálvez YH. Extended endoscopic endonasal approach to the skull base. *Minim Invasive Neurosurg.* 2009 Jun;52(3):114-8.
34. Santos AR, Fonseca Neto RM, Veiga JC et al. Endoscopic endonasal transsphenoidal approach for pituitary adenomas: technical aspects and report of casuistic. *Arq Neuropsiquiatr.* 2010 Aug;68(4):608-12.
35. Hamberger CA, Hammer G, Norlen G, Sjogren B. Transphenoidal hypophysectomy. *Arch Otolaryngol* 1961;74:2-8.
36. Hammer G, Radberg C. The sphenoidal sinus: an anatomical and roentgenologic study with reference to transsphenoid hypophysectomy. *Acta Radiol* 1961;56(6):401-22.
37. Güldner C, Pistorius SM, Diogo I, Bien S, Sesterhenn A, Werner JA. Analysis of pneumatization and neurovascular structures of the sphenoid sinus using cone-beam tomography (CBT). *Acta Radiol* 2012;53(2):214-9.
38. Kazkayasi M, Karadeniz Y, Arikan OK. Anatomic variations of the sphenoid sinus on computed tomography. *Rhinology* 2005; 43(2):109-14.
39. Citardi MJ, Gallivan RP, Batra PS, Maurer CR Jr, Rohlfing T, Roh HJ, Lanza DC. Quantitative computer-aided computed tomography analysis of sphenoid sinus anatomical relationships. *Am J Rhinol* 2004;18(3):173-8.
40. Chen YL, Lee LA, Lim KE. Surgical consideration to optic nerve protrusion according to sinus computed tomography. *Otolaryngol Head Neck Surg* 2006;134(3):499-505.
41. DeLano MC, Fun FY, Zinreich SJ. Relationship of the optic nerve to the posterior paranasal sinuses: a CT anatomic study. *AJNR Am J Neuroradiol* 1996;17(4):669-75.
42. Beale TJ, Madani G, Morley SJ. Imaging of the paranasal sinuses and nasal cavity: normal anatomy and clinically relevant anatomical variants. *Semin Ultrasound CT MR.* 2009; 30(1):2-16.

43. Bangert BA. Imaging of paranasal sinus disease. *Pediatr Clin North Am* 1997; 44(3):681-699.
44. Bolger WE, Butzin CA, Parsons DS: Paranasal sinus bony anatomic variations and mucosal abnormalities: CT analysis for endoscopic sinus surgery. *Laryngoscope* 1991 101(1 Pt 1):56-64.
45. Sarna A, Hayman LA, Laine FJ, et al: Coronal imaging of the osteomeatal unit: Anatomy of 24 variants. *J Comput Assist Tomogr* 2002. 26(1):153-7.
46. Fernandez-Miranda JC, Prevedello DM, Madhok R et al. Sphenoid septations and their relationship with internal carotid arteries: anatomical and radiological study. *Laryngoscope* 2009;119(10):1893-6.
47. Knosp E, Steiner E, Kitz K, Matula C. Pituitary adenomas with invasion of the cavernous sinus space: A magnetic resonance imaging classification compared with surgical findings. *Neurosurgery* 1993; 33(4):610-7;discussion 617-8.
48. Bladowska J, Bednarek-Tupikowska G, Sokolska V, Badowski R, Moroń K, Bonicki W, Sasiadek M. MRI image characteristics of materials implanted at sellar region after transsphenoidal resection of pituitary tumours. *Pol J Radiol.* 2010;75(2):46-54.
49. Dolinskas CA, Simeone FA. Transsphenoidal hypophysectomy: postsurgical CT findings. *AJR Am J Roentgenol.* 1985;144(3):487-92.
50. Berker M, Hazer DB, Yüzel T et al. Complications of endoscopic surgery of the pituitary adenomas: analysis of 570 patients and review of the literature. *Pituitary* 2012; 15(3):288–300.
51. Ammirati M, Wei L, Ciric I. Short-term outcome of endoscopic versus microscopic pituitary adenoma surgery: a systematic review and meta-analysis. *Neurol Neurosurg Psychiatry* 2013; 84(8): 843–849.
52. Hosemann W, Draft C. Danger points, complications and medico-legal aspects in endoscopic sinus surgery. *GMS Curr Top Otorhinolaryngol Head Neck Surg* 2013; 12: Doc06.
53. Kilty SJ, McLaughlin N, Bojanowski MW, Lavigne F. Extracranial complications of endoscopic transsphenoidal sellar surgery. *J Otolaryngol Head and Neck Surg* 2010;39(3):309–14.
54. Gondim JA, Almeida JP, Albuquerque LA et al. Endoscopic endonasal approach for pituitary adenoma: surgical complications in 301 patients. *Pituitary* 2011;14(2):174-83.
55. Nduom EK, Barrow EM, Patel ZM, Oyesiku NM. Transnasal approaches to the sellar and parasellar region: Open and endoscopic. *Operative Techniques in Otolaryngology Head and Neck Surgery* 2013; 24 (4): 208-212.
56. Charalampaki P, Reisch R, Ayad A et al. Endoscopic endonasal pituitary surgery: surgical and outcome analysis of 50 cases. *J Clin Neurosci* 2007;14(4):410–5.
57. Frank G, Pasquini E, Farneti G, et al. The endoscopic versus the traditional approach in pituitary surgery. *Neuroendocrinology* 2006;83(3-4):240–8.
58. Senior BA, Ebert CS, Bednarski KK, et al. Minimally invasive pituitary surgery. *Laryngoscope* 2008;118(10):1842–55.
59. Santos R de P, Zymberg ST, Abucham Filho JZ, Gregório LC, Weckx LL. Endoscopic transnasal approach to sellar tumors. *Braz J Otorhinolaryngol* 2007;73(4):463-75.

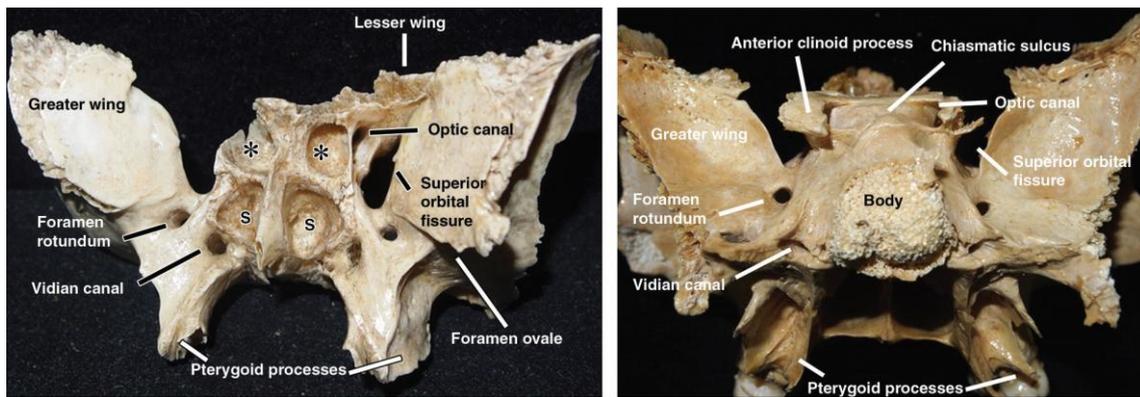
FIGURE LEGENDS



a. **Figure 1.** Anatomy of the middle cranial fossa and sphenoid bone. **(a, b)** Intracranial top view in dried bone **(a)** and volume rendering CT reconstruction **(b)**, showing the sella turcica (*S*), carotid canal (*), optic canal, superior orbital fissure and rotundum, ovale and spinosum foramina.



a. **Figure 2.** Anatomical relationships of the sphenoid sinus. **(a, b)** Sagittal view of nasal fossa and sinuses in a cadaver head **(a)** and volume rendering CT reconstruction **(b)**, showing the anatomical relationships of the sphenoid sinus (*S*), bordered by the ethmoidal cells (*E*) anteriorly, the clivus (*Cl*) posteriorly, the pituitary fossa (*Pi*) and planum sphenoidale (*Ps*) superiorly and the choana (*Ch*) inferiorly.



a. **Figure 3.** Sphenoid bone anatomy in dried bone. **(a)** Anterior view; note bilateral Onodi cells (*) as anatomic variant projecting over sphenoidal sinus (S), leading to a cruciform configuration. **(b)** Posterior view.



Figure 4. Intraoperative photograph showing the operating room during pituitary surgery with CAS system. The computer workstation (arrows) is usually mobile for ease of use in the operating room and placement with respect to the position of the operating table. Left sided monitor shows the CAS system information with CT and endoscopic correlation. The monitor at the right shows real time endoscopic view.

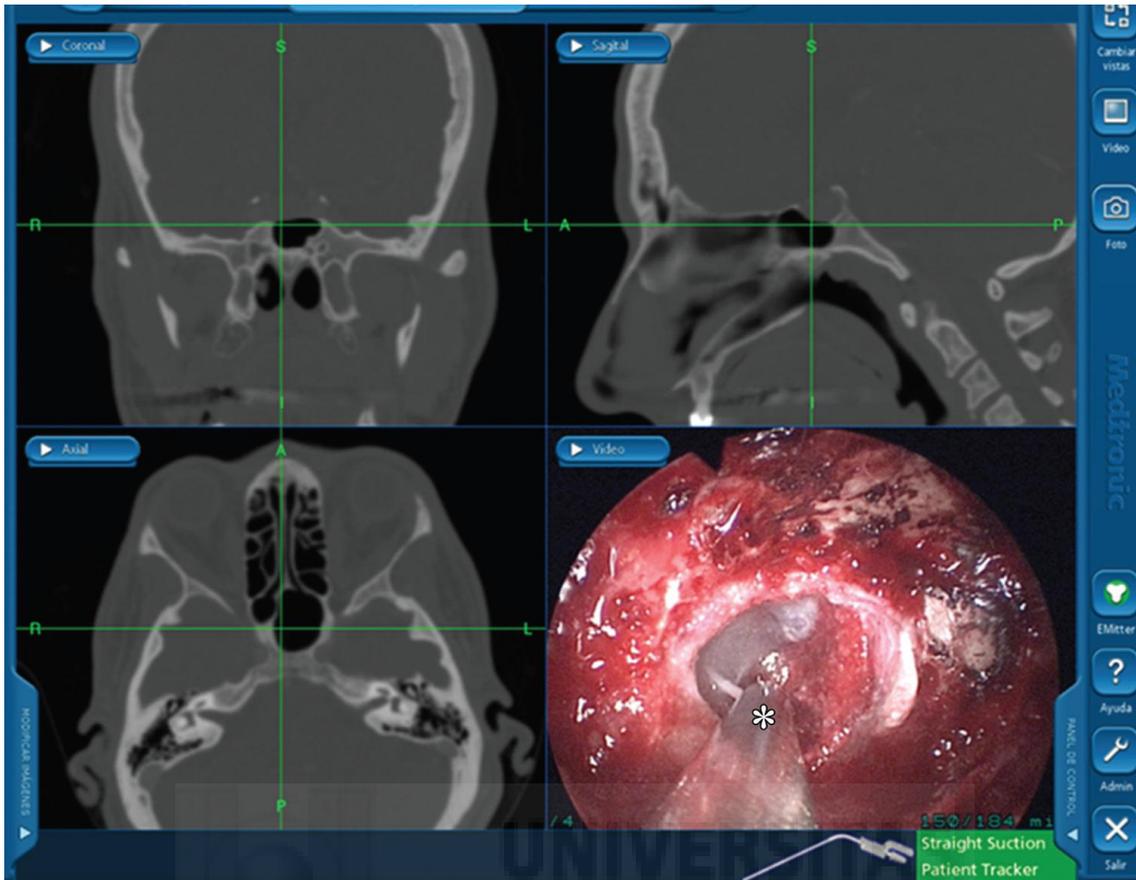


Figure 5. Intraoperative still screen capture of the CAS system, obtained during endoscopic transsphenoidal resection of pituitary macroadenoma, illustrating the typical screen layout on the computer monitor during surgical navigation, after opening the dorsum sellae. The lower right panel is the endoscopic video image that is imported as a picture-in-picture display, with the remaining three panels showing orthogonal CT views. Surgical navigation systems can track the position of the instrument tip (in this case, the tip of the suction aspirator) (*) and project its calculated position on the preoperative imaging, as indicated by the cross hairs on axial, coronal and sagittal CT images.

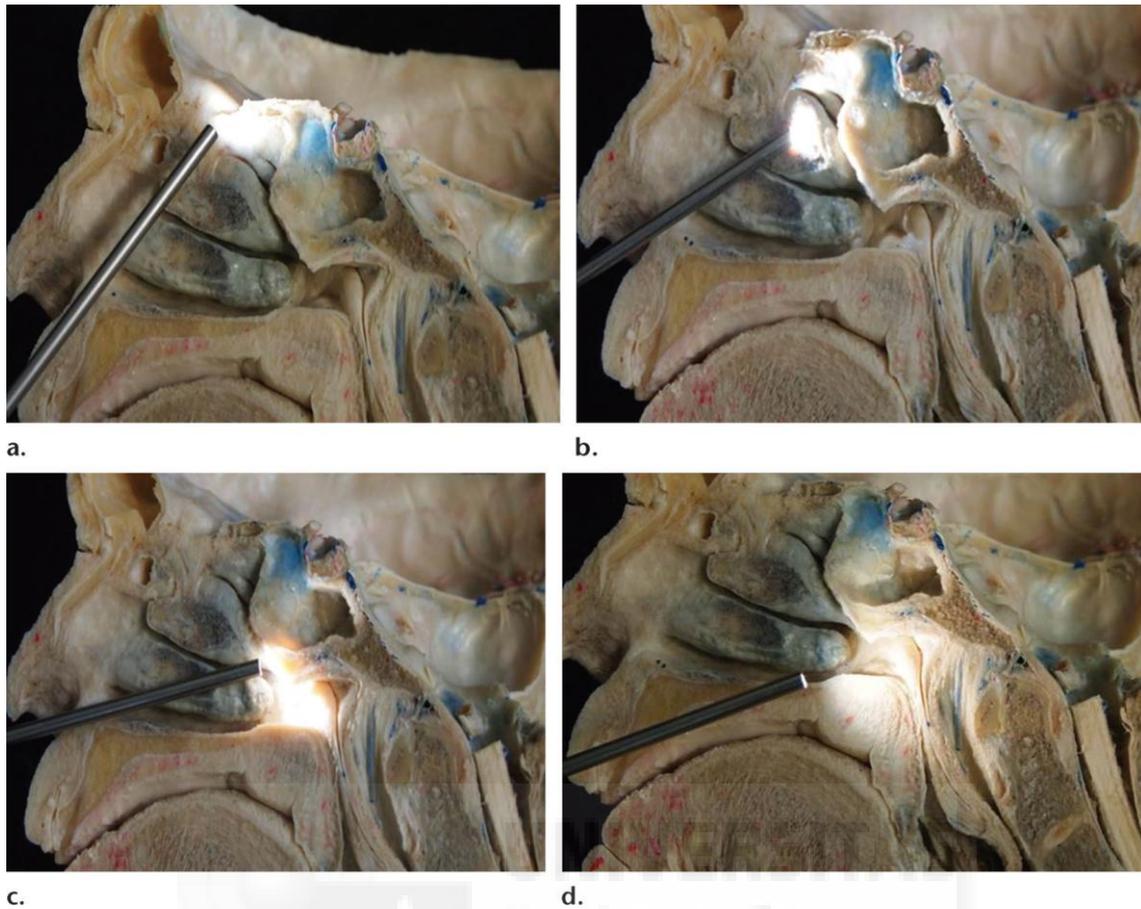


Figure 6. Different endoscopic approaches shown in a midline parasagittal section of a cadaver head. Images show the endoscopic route to the olfactory groove **(a)**, the sella turcica and planum sphenoidale **(b)**, the clivus **(c)**, and the craniovertebral junction and foramen magnum **(d)**.

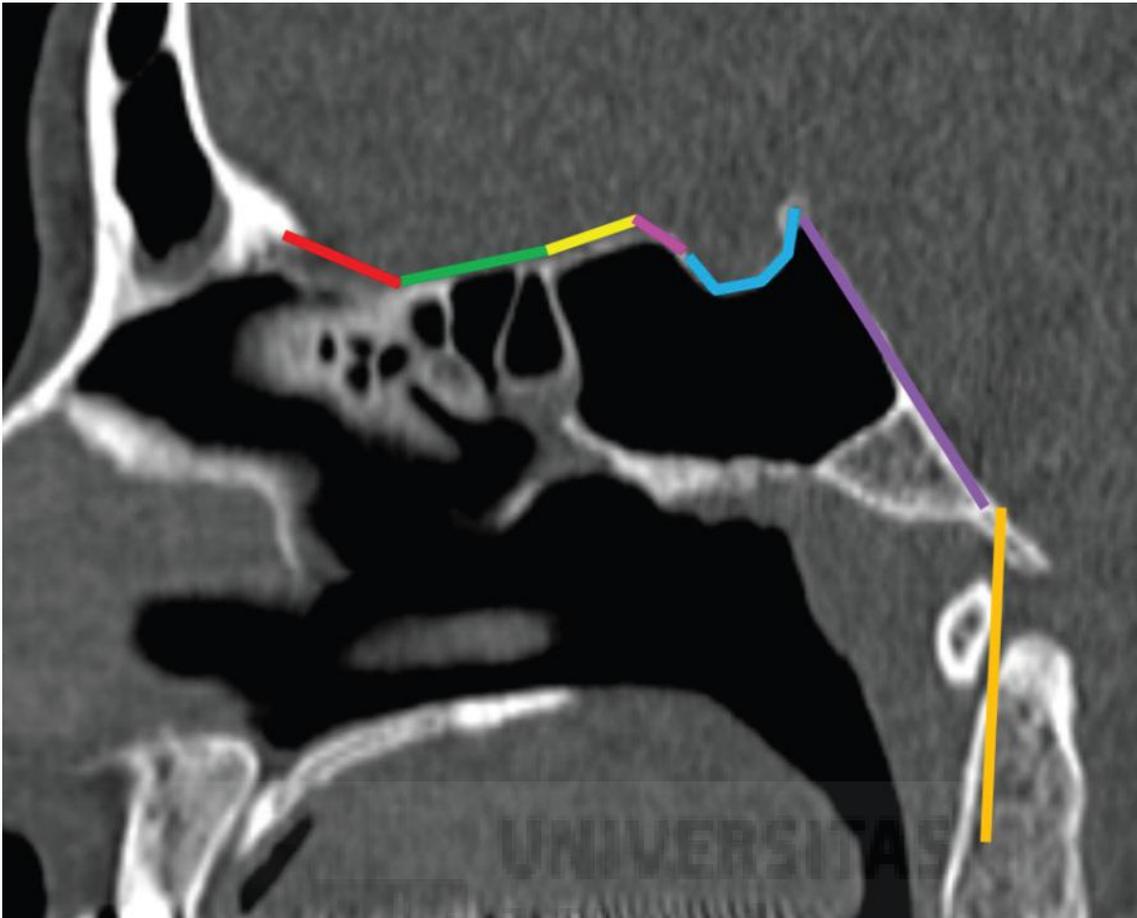


Figure 7. Sagittal CT section with color marks illustrating different target areas that permit entering the skull base: cribriform plate in red, planum ethmoidale in green, planum sphenoidale in yellow, tuberculum sellae in pink, dorsum sellae in blue, clivus in purple and craniovertebral junction and anterior portion of the foramen magnum in orange.

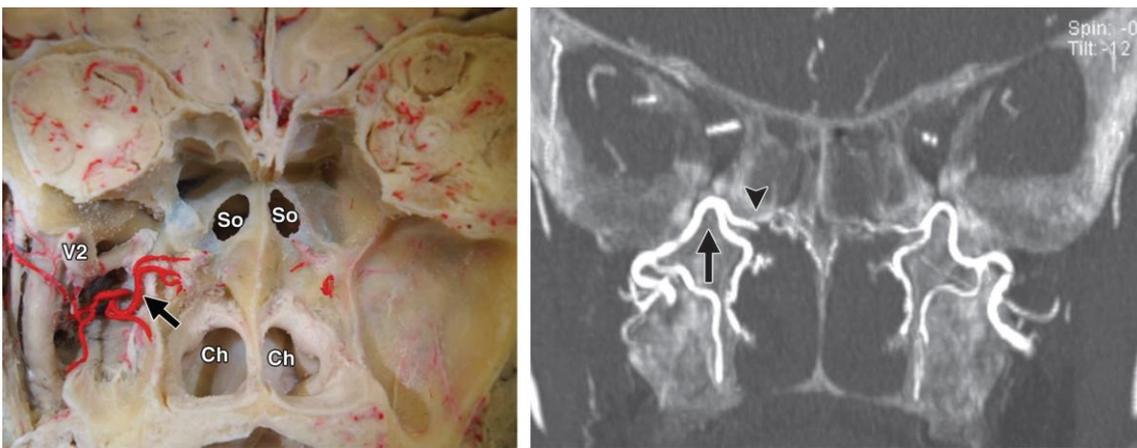


Figure 8. Sphenopalatine artery and posterior septal branches in a cadaver head with opacified vessels using a radiopaque intravascular material. **(a,b)** Coronal section in a cadaver head **(a)** and maximum intensity projection (MIP) in coronal CT reconstruction **(b)** show the sphenopalatine artery (continuous arrows) passing through the sphenopalatine foramen and its posterior septal

branches (discontinuous arrows) lying in inferolateral position of the sphenoid sinus ostia. *So* = Sphenoid sinus ostia. *Ch* = Choana. *V2* = Maxillary nerve.

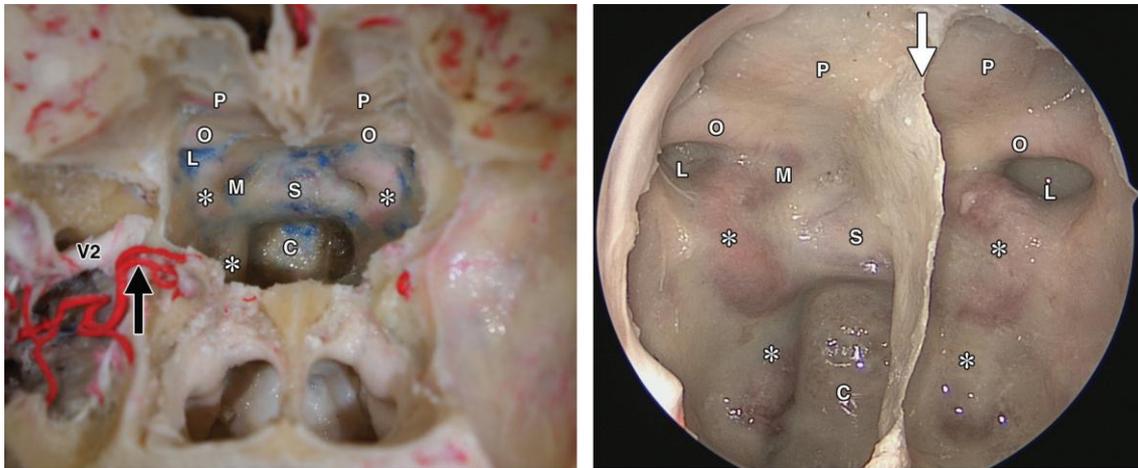


Figure 9. Recesses and bony prominences of neurovascular structures in the sphenoid sinus in a cadaver head with opacified vessels using a radiopaque intravascular material. **(a,b)** Anterior view of the sphenoid sinus **(a)**, where sphenoidal rostrum, septa, sellar and parasellar bone were removed and endoscopic sphenoid sinus anterior view after anterior sphenoidotomy **(b)**, showing prominence of both intracranial carotid arteries (parasellar and paraclival segments) (*) and optic nerves (*O*), lateral and medial opticocarotid recesses (*L* and *M* respectively), clival recess (*C*), planum sphenoidale (*P*) and bulge of the sella (*S*). *V2* = Maxillary nerve. Black arrow = sphenopalatine artery. White arrow = intersinus septum.

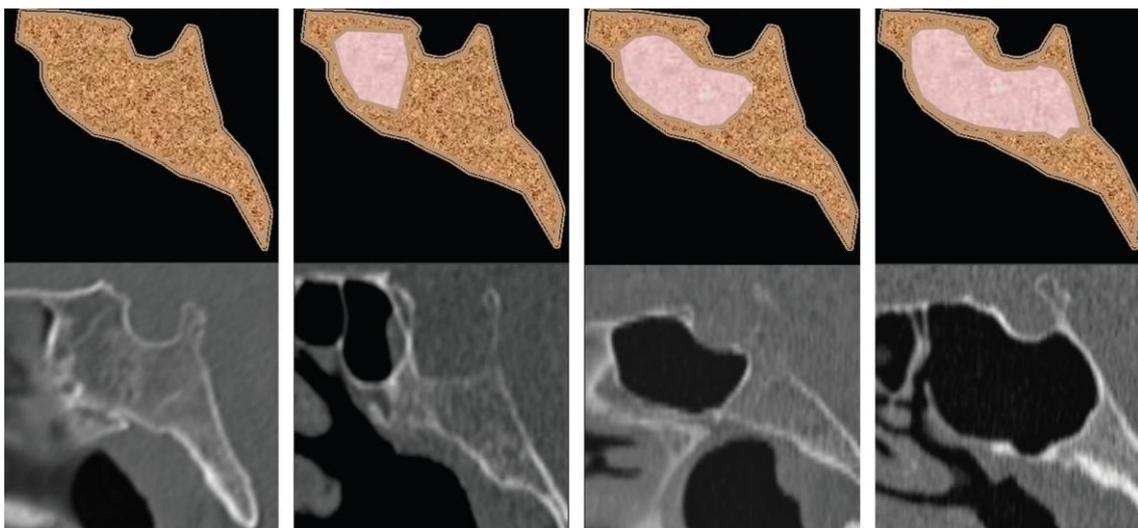
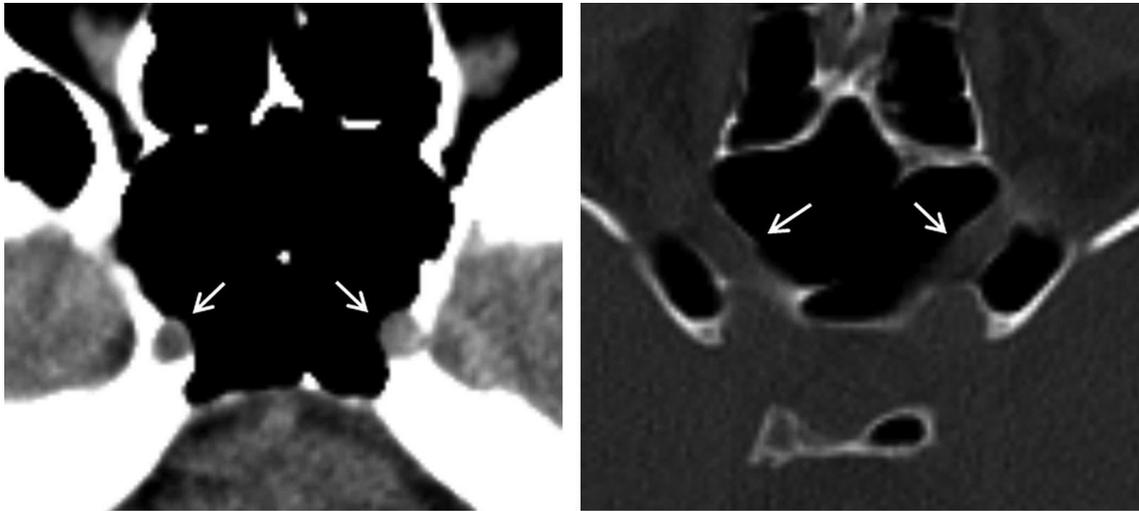
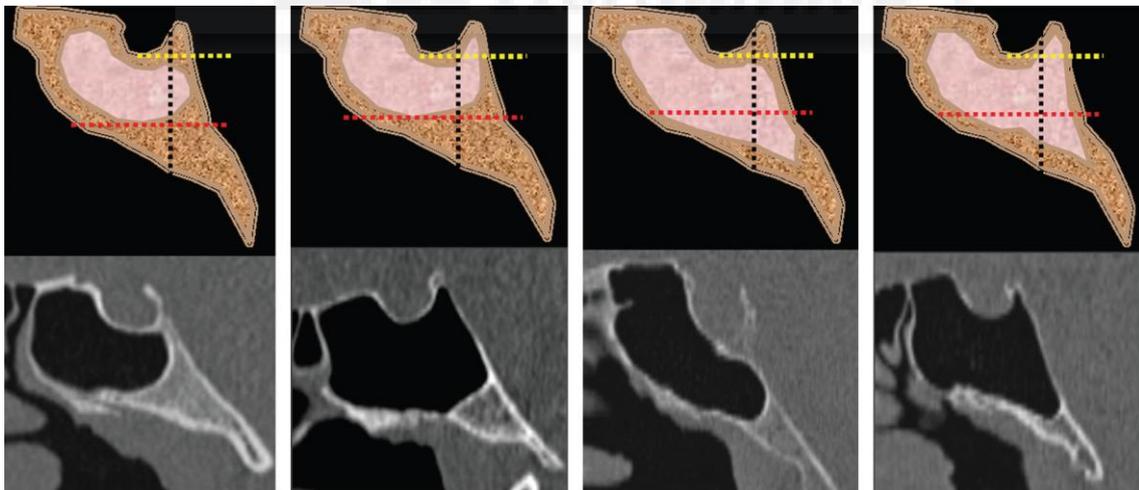


Figure 10. Traditional classification of sphenoid pneumatization correlating drawings with sagittal CT images **(a-d)**; conchal **(a)**, presellar **(b)**, incomplete sellar **(c)**, complete sellar **(d)**. **(a)** In conchal type, the region below the sella is completely ossified, consisting in a solid block of bone without any air cavity. **(b)** In presellar type, the air cavity does not penetrate beyond a vertical plane parallel

to the anterior sellar wall. **(c,d)** In sellar type, the sphenoid sinus is well pneumatized with bulging of the sellar floor into the sinus. The air cavity extends into the body of sphenoid below the sella (incomplete sellar subtype **(c)**) and can reach the posterior margin of the clivus, forming the clival recess (complete sellar subtype **(d)**).



a. **b.**
Figure 11. Bony prominences or dehiscences of neurovascular structures in the sphenoid sinus. **(a)** Axial CT image shows dehiscent paraclival carotid arteries (arrows) bulging into the posterolateral sphenoidal sinuses with clival extensions. **(b)** Axial CT image shows both optic nerves (arrow) completely surrounded by air in bilateral lesser wing pneumatization.



a. **b.** **c.** **d.**
Figure 12. Clival extensions of sphenoid pneumatization illustrated by correlation between drawings and sagittal CT images **(a-d)**; subdorsum **(a)**, dorsum **(b)**, occipital **(c)**, combined dorsum-occipital **(d)**. **(a)** In subdorsum type, the sinus extends posterior to a line directed along the posterior wall of the sella (black discontinuous line), but not into the dorsum sellae or into the clivus below the level of the vidian canal (red discontinuous line). **(b)** In dorsum type, the sinus extends above the line directed along the floor of the sella and into the dorsum

sellae (yellow discontinuous line). **(c)** In occipital type, pneumatization of the sinus behind the posterior wall of the sella (black discontinuous line) extends inferiorly below the level of the horizontal plane directed along the upper edge of the paired vidian canals (red discontinuous line). **(d)** In combined dorsum-occipital type, sinus extends superiorly into the dorsum (yellow discontinuous line) and downward below the horizontal plane directed along the upper edge of the vidian canals (red discontinuous line).

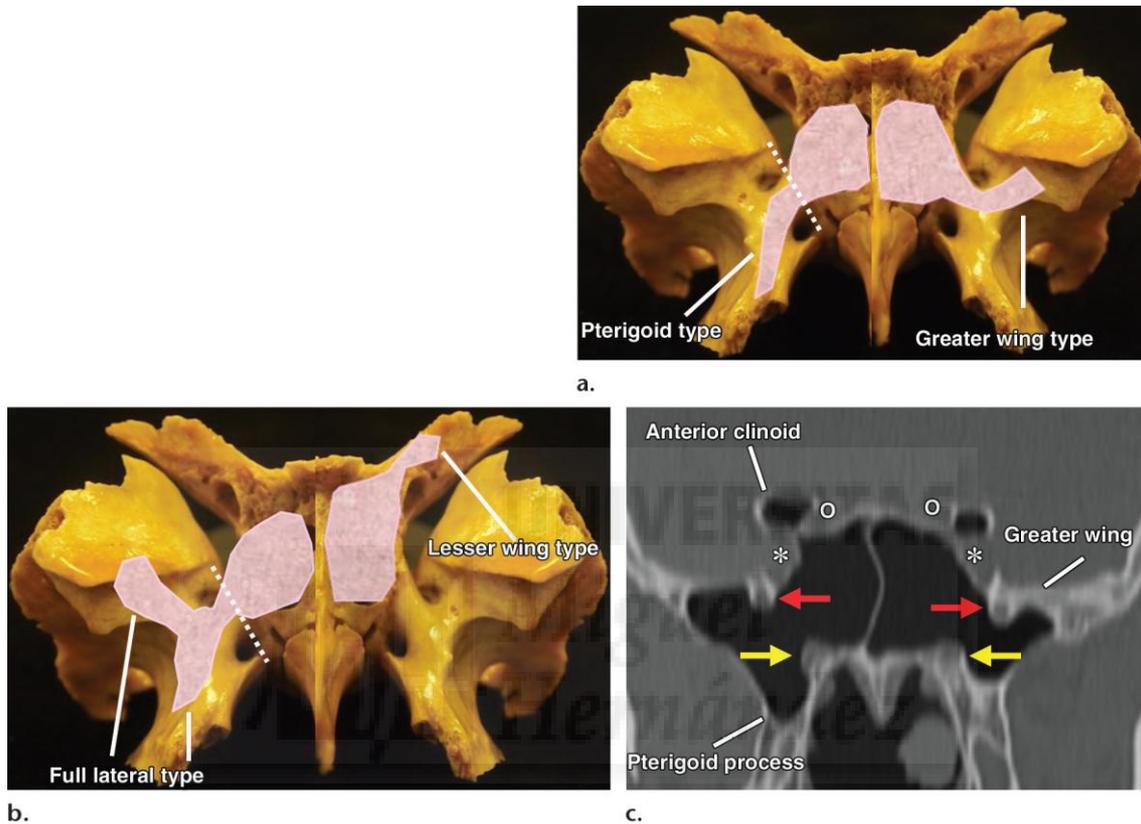
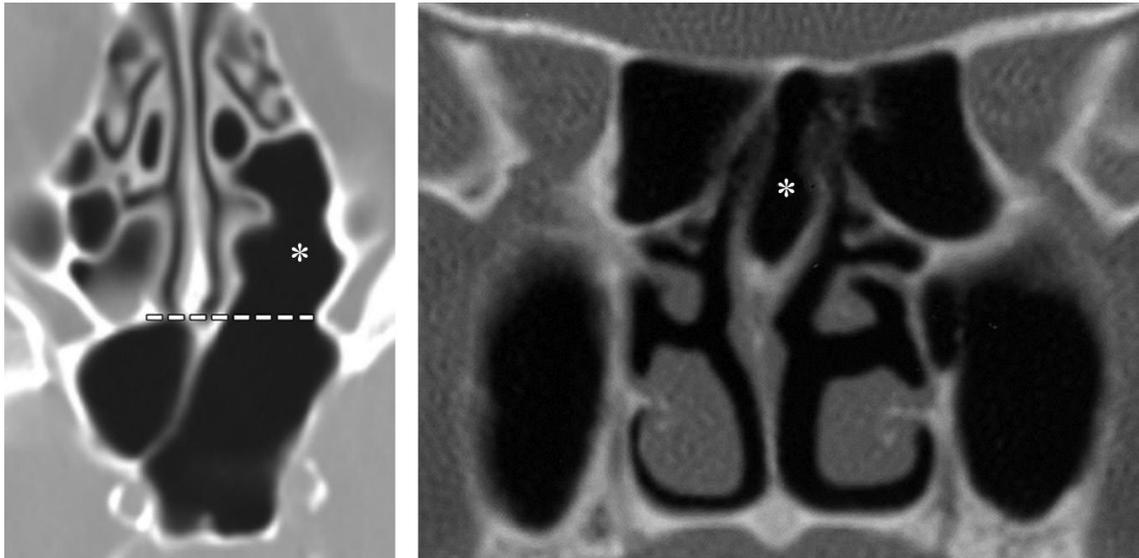


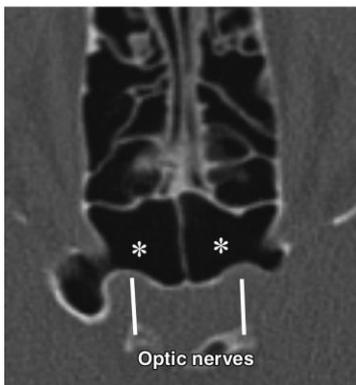
Figure 13. Lateral and lesser wing extensions of sphenoid pneumatization illustrated by correlation between drawings in a dried sphenoid bone **(a,b)** and coronal CT image **(c)**. The VR line between the medial edge of foramen rotundum and vidian canal is marked by a discontinuous white line. Drawings in **(a)** show the pterigoid type pneumatization on the left side and the greater wing type pneumatization on the right side and in **(b)** the full lateral type pneumatization on the left side and lesser wing type pneumatization on the right side. **CME5c{(c)** Coronal CT image shows full lateral pneumatization of the right sphenoid sinus, greater wing pneumatization of the left sphenoid sinus and bilateral lesser wing pneumatization. Note bulging of both optic nerves (*O*), internal carotid arteries (*), maxillary nerves (red arrow) and vidian nerves (yellow arrows), some of them dehiscent.}



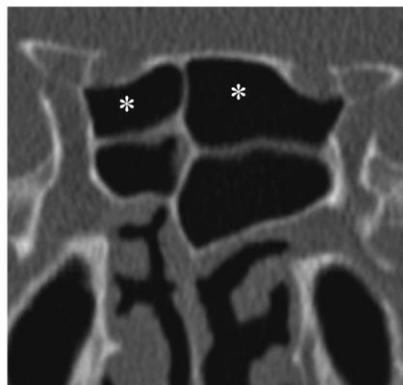
a. **b.**
Figure 14. Anterior extensions of sphenoidal pneumatization. **(a)** Axial CT image shows an anterolateral protusion of the sphenoid sinus anterior to a transverse line crossing the sphenoid sinus side of the sphenoid crest (red discontinuous line) to form the etmoidal recess (*), facing the maxillary sinus. This type of sinus extends anteriorly above the sphenopalatine artery and foramen. **(b)** Coronal CT image illustrates pneumatization of the posterior portion of nasal septum or vomer, called sphenovomerine bulla (*).



a.



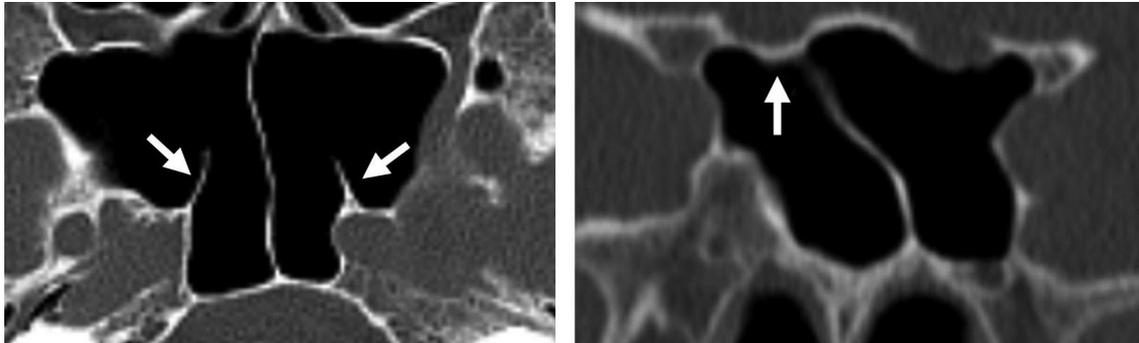
b.



c.

Figure 15. Onodi cells. **(a,b)** Axial CT images show Onodi cells (*) with anterior clinoid pneumatization, appreciating parasellar internal carotid arteries (ICA) and

optic nerves bulging into these posterior ethmoidal cells. **CME8c**{(c) Coronal CT image illustrates the cruciform configuration resulting from bilateral Onodi cells (*) projecting over and/or lateral to the sphenoid sinus.}



a. **b.**
Figure 16. Intrasphenoidal septae insertions. **(a)** Axial CT image show bilateral accessory septa inserting over both paraclival internal carotid arteries (arrows). **(b)** Coronal CT image shows intersinus septum inserting over the right optic nerve canal (arrow).

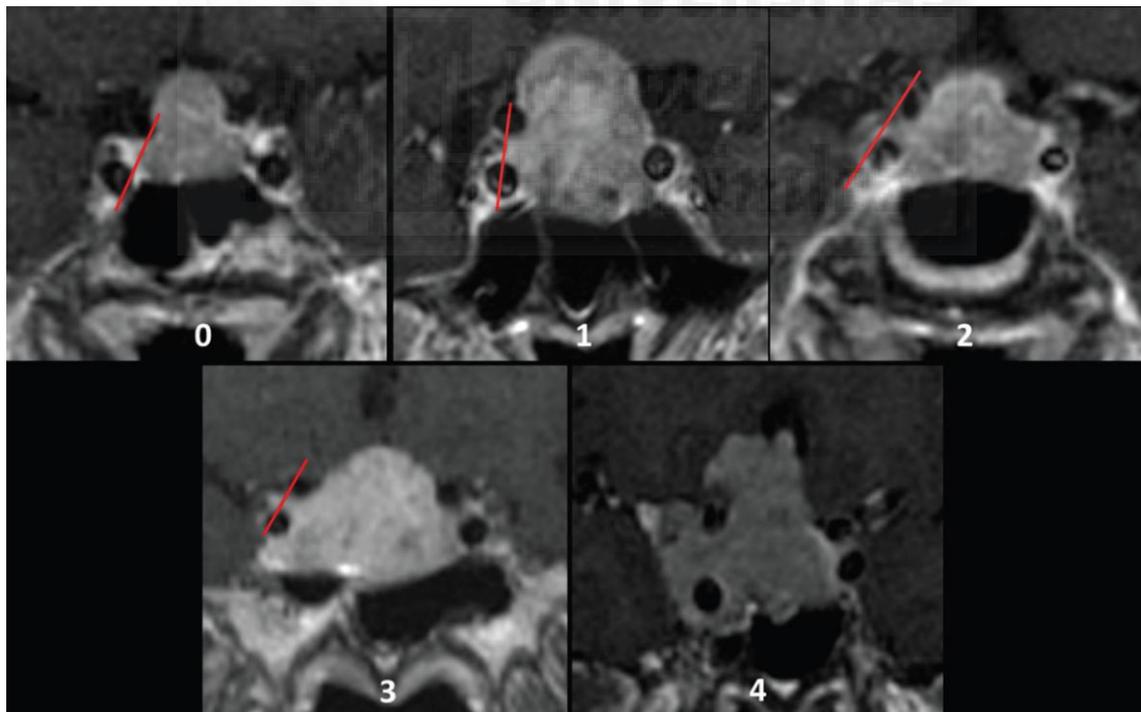
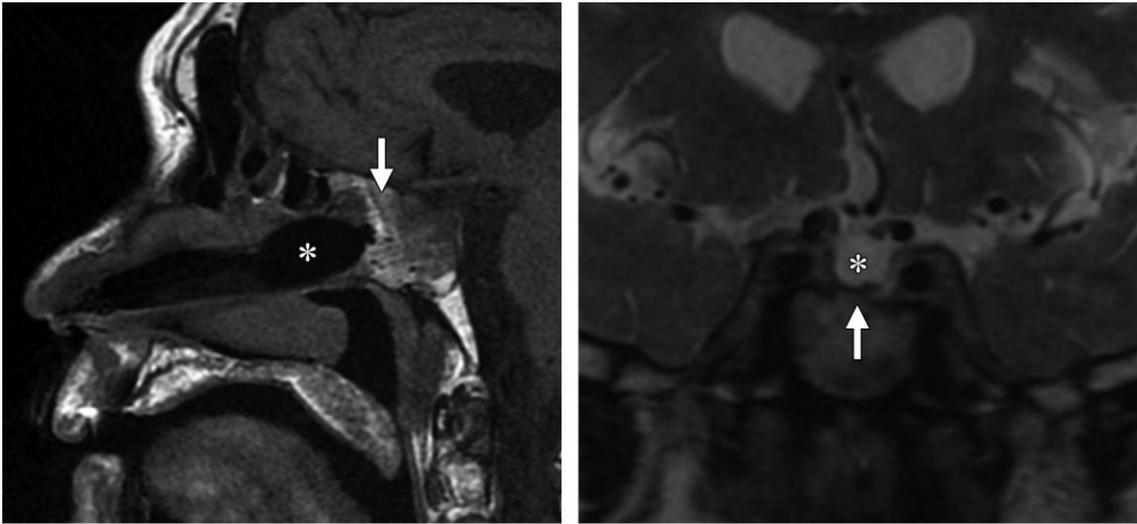


Figure 17. Coronal T1 weighted MR images after Gadolinium injection showing the Knosp-Steiner classification of cavernous sinus invasion by macroadenoma based on the extent of lateral tumor growth in relationship to a series of tangential lines drawn between the intracavernous and supracavernous internal carotid arteries. The system describes 5 grades of invasion, ranging from 0 to 4.



a. **Figure 18.** Sagittal CT image illustrates CSF leakage (arrow) with extensive pneumocephalus 12 days after arachnoid cyst transsphenoidal surgery.

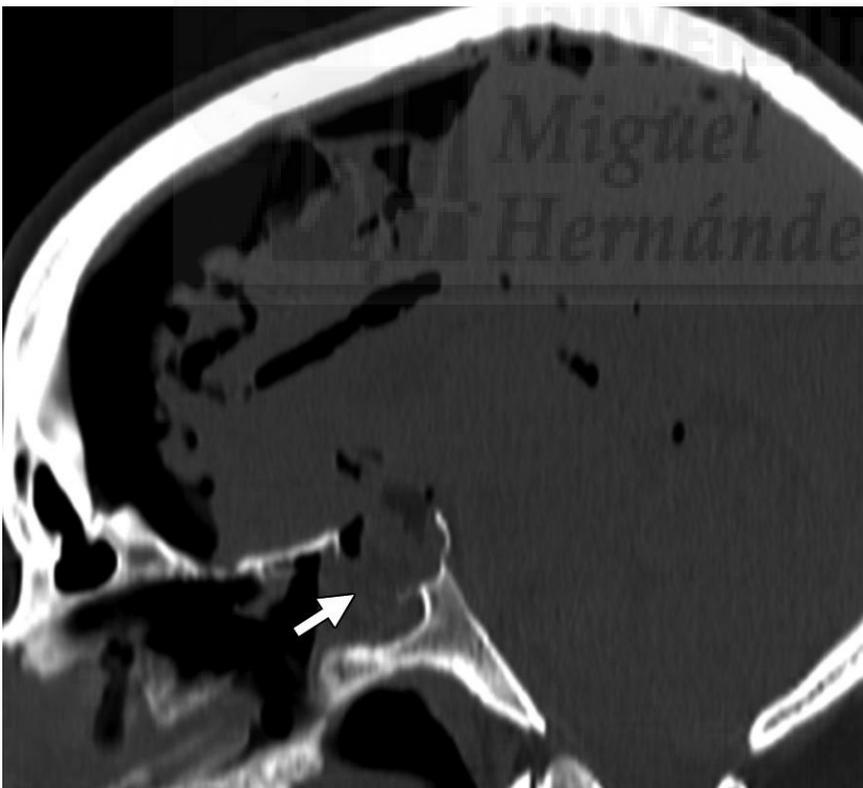


Figure 19. Axial CT image shows a suprasellar and intraventricular hemorrhage (arrows) after transsphenoidal surgery for recurrent pituitary macroadenoma. Note right temporal craniotomy secondary to open approach performed 20 years before.

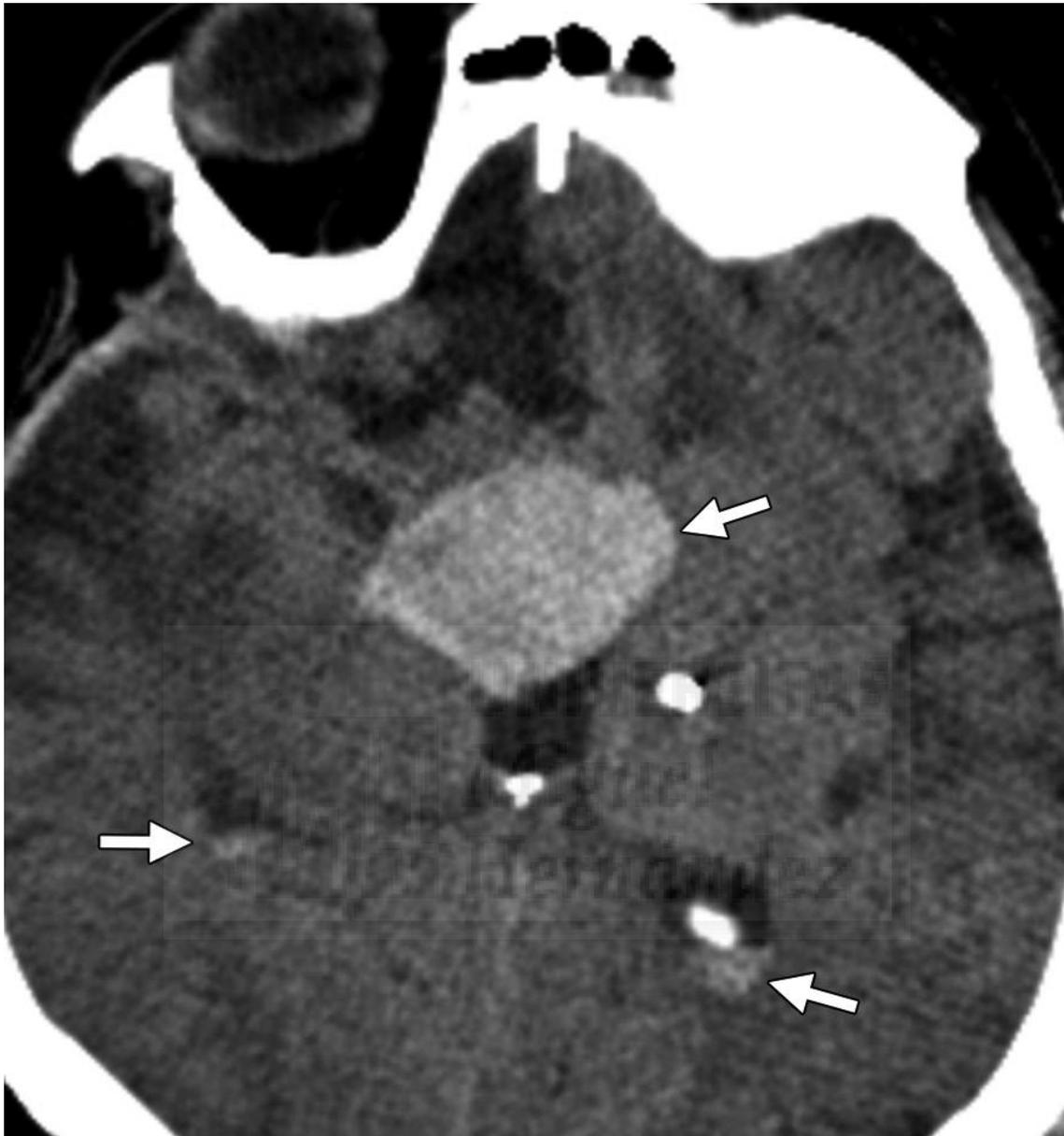


Figure 20. Axial CT image obtained after transsphenoidal surgery for recurrent pituitary macroadenoma shows suprasellar and intraventricular hemorrhage (arrows). Note the right temporal craniotomy secondary to open-approach surgery performed 20 years previously.

TABLES**Table 1.****Common surgical indications for endoscopic endonasal transsphenoidal approach**

Pituitary tumor (first attempt or recurrent)
 Craniopharyngioma
 Rathke's cleft cyst
 Germinoma
 Arachnoid cyst
 Epidermoid
 Pituitary apoplexy
 Empty sella syndrome
 Meningioma
 CSF leakage
 Clival tumor
 Sinonasal neoplasms

Note.- CSF = cerebrospinal fluid

Table 2**Complications of the endoscopic transsphenoidal surgery****Rhinological**

Excessive nasal crusting
 Epistaxis
 Synechiae formation
 Hyposmia-anosmia

CSF leak**Infection**

Sinusitis
 Meningitis

Endocrinological

Anterior pituitary deficiency
 Diabetes insipidus
 Syndrome of inappropriate secretion of antidiuretic hormone

(SIADH)**Visual disturbances**

Vision loss
 Visual field defects

Vascular

Arterial injury
 Intracranial hematoma

Note.- CSF = cerebrospinal fluid

10.2 REFERENCIA FUNDAMENTAL NUM 2.

- **Abarca-Olivas J, Monjas-Cánovas I, López-Álvarez B, Lloret-García J, Sanchez-del Campo J, Gras-Albert JR, Moreno-López P. [Three-dimensional endoscopic endonasal study of skull base anatomy]. Neurocirugía (Astur). (Q4). 2014 Jan-Feb;25(1):1-7.**

Doi: 10.1016/j.neucir.2013.02.009. Spanish. PubMed PMID: 24447642.

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

CASTELLANO

Resumen

Introducción

El entrenamiento en la disección de los senos paranasales y la base de cráneo es esencial para el conocimiento anatómico y la correcta aplicación de las técnicas quirúrgicas. La visualización tridimensional de la anatomía endoscópica de la base de cráneo mejora la orientación espacial y permite la percepción de profundidad.

Objetivo

Mostrar la anatomía endoscópica de la base de cráneo basado en la técnica tridimensional.

Métodos

Realizamos disección endoscópica endonasal en especímenes cadavéricos fijados con formol y con la técnica de Thiel, ambos con inyección intravascular de colorantes. Los abordajes fueron realizados

con endoscopios convencionales 2D. Posteriormente aplicamos la técnica 3D anaglífica para ilustrar las figuras.

Resultados

Se ilustran las más importantes estructuras y referencias anatómicas de la región selar desde la perspectiva endonasal endoscópica en tres dimensiones.

Conclusión

La base de cráneo esta compuesta por complejas estructuras óseas y neurovasculares. La experiencia con la disección en cadáver es crucial para comprender la anatomía y desarrollar habilidades quirúrgicas. La visualización 3D representa una útil herramienta para comprender la anatomía de la base de cráneo.

Palabras clave: tridimensional, endoscópico endonasal, base de cráneo, anatomía quirúrgica, anaglifo, estereoscópico.

ENGLISH

Summary

Introduction

Training in dissection of the paranasal sinuses and the skull base is essential for anatomical understanding and correct surgical techniques. The 3D visualization of the endoscopic skull base anatomy increases the spatial orientation and allows the depth perception.

Objective

To show the endoscopic skull base anatomy based on three-dimensional technique.

Methods

We performed endoscopic dissection in cadaveric specimens fixed by formalin and Thiel technique, both prepared with intravascular injection of colored material. Endonasal approaches were performed with conventional 2D endoscopes. Then we applied the 3D anaglyphic technique to illustrate the 3D pictures.

Results

The most important anatomical structures and landmarks of the sellar region under endonasal endoscopic vision are illustrated in three-dimensional images.

Conclusion

The skull base consists of complex bony and neurovascular structures. Experience with cadaver dissection is essential to understand the complicated anatomy and develop surgical skills. 3D view represents a useful way of understanding the skull base anatomy.

Key words: three-dimensional, endoscopic endonasal, skull base, surgical anatomy, anaglyphic, stereoscopic.

TEXTO

RECOMENDACIONES PARA LA CORRECTA VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES.

Este artículo contiene imágenes construidas para visualización en 3D, por lo que es IMPRESCINDIBLE LA ADQUISICIÓN DE GAFAS ESPECIALES (ANAGLIFO) PARA SU VISUALIZACIÓN. (Figura 1)

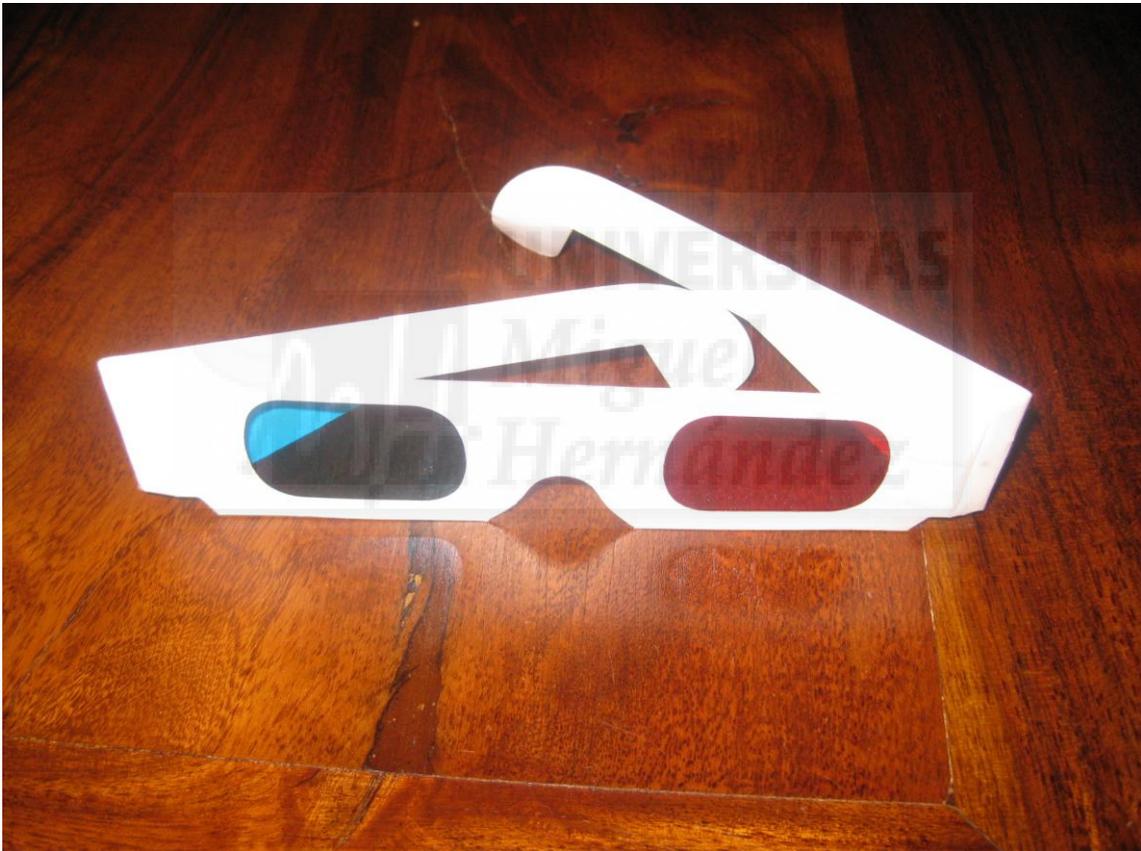


Figura 1.- Gafas anaglifo: Visor derecho azul-visor izquierdo rojo.

Introducción.

La anatomía de la nariz, senos paranasales y la base de cráneo resulta de extrema complejidad dada la peculiar disposición espacial de las estructuras óseas y neurovasculares que asientan en esta región (1). La variabilidad interindividual de la pneumatización de los senos paranasales hace imprescindible algo más que un exhaustivo conocimiento de la anatomía para realizar correctamente un abordaje quirúrgico. Las técnicas de navegación por imagen constituyen una herramienta de obligado uso en cirugías en las que se precisa un adecuado control de las estructuras neurovasculares que quedan ocultas a la vista del cirujano en la mayoría de los casos: nervios ópticos, arterias carótidas, seno cavernoso, nervios oculomotores, arteria basilar, etc... El neurocirujano tradicionalmente se ha sentido familiarizado con la anatomía de esta región desde un punto de vista intracraneal. El abordaje transesfenoidal a la hipófisis se ha desarrollado hasta hace un par de décadas con la ayuda del microscopio. Esta herramienta suponía una limitación en la amplitud de la visión quirúrgica. Sin embargo existe un aspecto en el que la visión del microscopio ha resultado superior a la endoscopia: la estereoscopia o visión tridimensional. Sin entrar en detalles, la estereoscopia, imagen estereográfica, o imagen 3D (tridimensional) es cualquier técnica capaz de recoger información visual tridimensional o de crear la ilusión de profundidad en una imagen. En una fotografía, película, u otra imagen bidimensional este fenómeno es creado presentando una imagen ligeramente diferente para cada ojo, como ocurre en nuestra forma habitual de recoger la realidad. Si existe una región anatómica en la que interesa alcanzar esta visualización esta es la base del cráneo desde su visión endonasal.

Objetivo.

El propósito de este artículo es realizar un acercamiento a la exposición de la anatomía endoscópica de la base de cráneo mediante imágenes diseñadas para su visualización tridimensional. Se han seleccionado imágenes de disección en especímenes anatómicos que resultan ilustrativas del beneficio que la técnica tridimensional puede aportar a la divulgación de esta compleja anatomía. Ni el número de especímenes ni el diseño del trabajo pretenden obtener resultados ni conclusiones relacionadas con los hallazgos anatómicos.

Método.

Se llevan a cabo disecciones en 5 especímenes anatómicos conservados 3 de ellos con técnica de Thiel (2) y otros 2 con formol. Todos ellos sometidos a inyección intravascular de sustancia colorante. La técnica de Thiel permite una óptima preservación de los tejidos excepto del cerebro, por lo que las fotografías de la anatomía endonasal están basadas en este método y las de estructuras intradurales están formoladas. Se ha usado endoscopio Karl Storz, 4 mm, 18 cm, Hopkins II; (Karl Storz, Tuttlingen, Alemania) con óptica 0°. Las fotografías se han adquirido con sistema AIDA de digitalización de imágenes. La técnica para obtener la visión 3D requiere la toma de pares de imágenes con discreta angulación (2-3mm) de la óptica manteniendo la estructura a fotografiar en el centro del enfoque. Después se realiza la fusión de los pares de imágenes con ayuda de un software especializado en fusionar y configurar pares de fotografías estereoscópicas. Éste modifica los colores de cada fotografía de tal

modo que en la imagen final , y con la ayuda de unas gafas especiales (anaglíficas rojo-izquierda/ azul-derecha; (figura 1), cada ojo perciba una imagen por separado del otro ojo. Esta técnica de creación de imágenes 3D a partir de imágenes 2D recibe el nombre de anaglifo y, a día de hoy, es la única forma de visualizar fotos en 3d desde un documento impreso o proyectado desde una pantalla convencional.

Resultados.

A continuación se exponen diferentes detalles y referencias anatómicas de la base del cráneo bajo visión endoscópica siguiendo la secuencia habitual de un abordaje transesfenoidal. Las imágenes se presentan por pares (figuras 2-8). La fotografía de la izquierda corresponderá a la imagen endoscópica habitual en 2D donde se señalan las referencias anatómicas más importantes. La fotografía de la derecha mostrará la visión tridimensional que corresponda a dicha región. Se han seleccionado aquéllas imágenes que a nuestro entender más se benefician de la técnica 3d por la disposición de sus componentes a diferentes distancias.

A) SEPTUM-ROSTRUM ESFENOIDAL

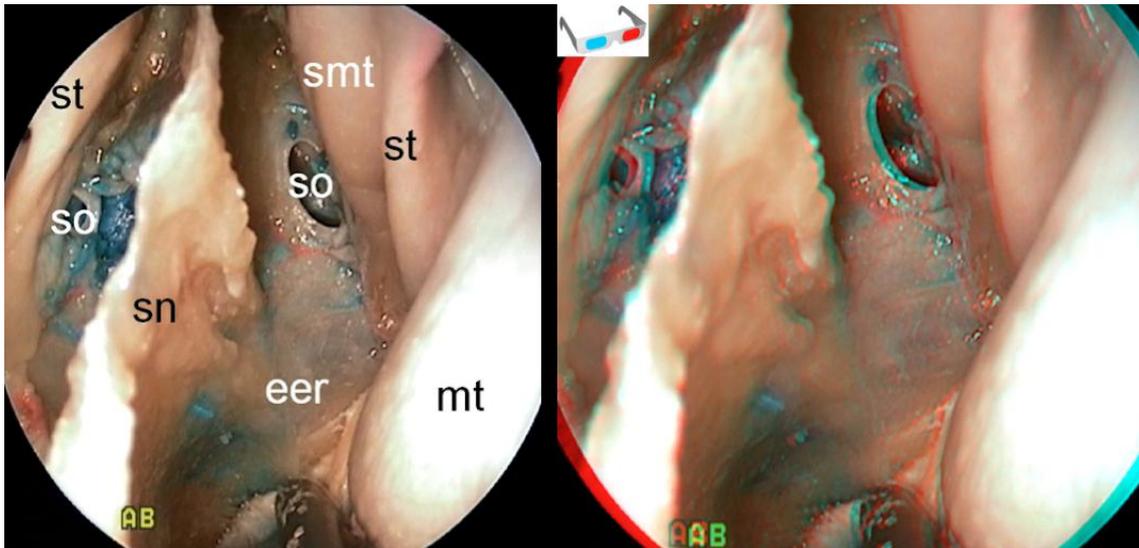


Figura 2. Visión del rostrum esfenoidal desde la fosa nasal izquierda con el tercio posterosuperior del Septum nasal resecaado y respetando el vómer. Véase la relación de los cornetes con el ostium esfenoidal y el receso esfeno-etmoidal. En este espécimen se aprecia la existencia de un cuarto cornete o cornete supremo.

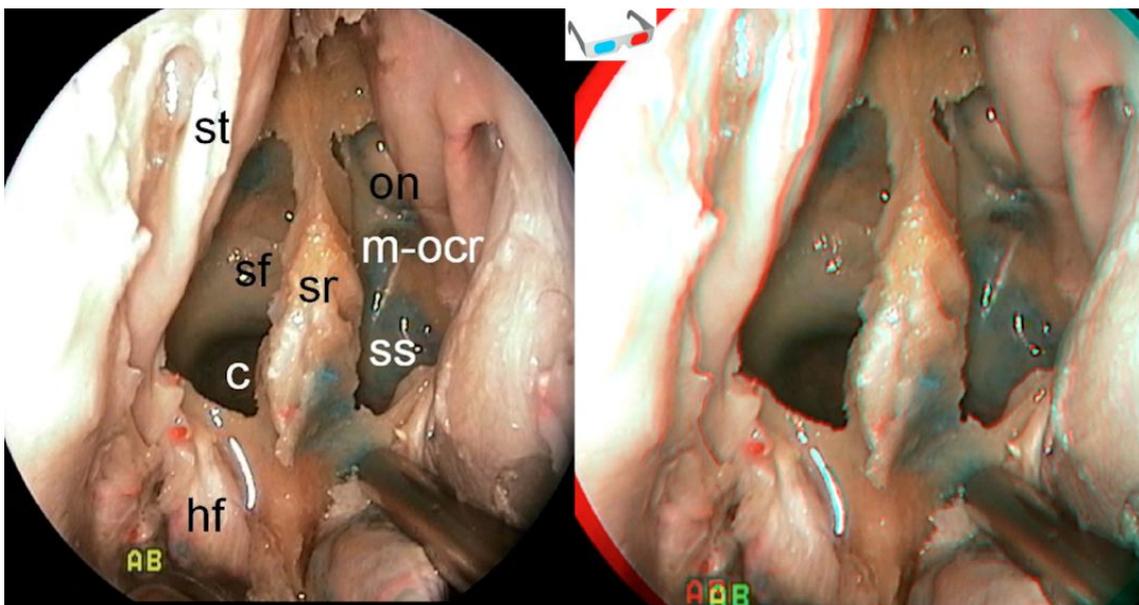


Figura 3. Visión del rostrum esfenoidal una vez resecado el septum. Se han ampliado ambos ostium y a través suyo algunas referencias anatómicas pueden ser reconocidas dentro del seno esfenoidal. Se ha preparado un colgajo de mucosa nasoseptal pediculado o de Hadad que se ha conservado en la coana derecha.

Abreviaturas figuras 2 y 3: c: clivus; eer: receso esfeno-etmoidal; hf: colgajo de Hadad; m-ocr: receso optocarotídeo medial; mt: cornete medio; on: nervio óptico; sf: suelo selar; smt: cornete supremo; so: ostium esfenoidal; sr: rostrum esfenoidal; ss: septum intraesfenoidal; st: cornete superior.

B) INTRAESFENOIDAL EXTRADURAL

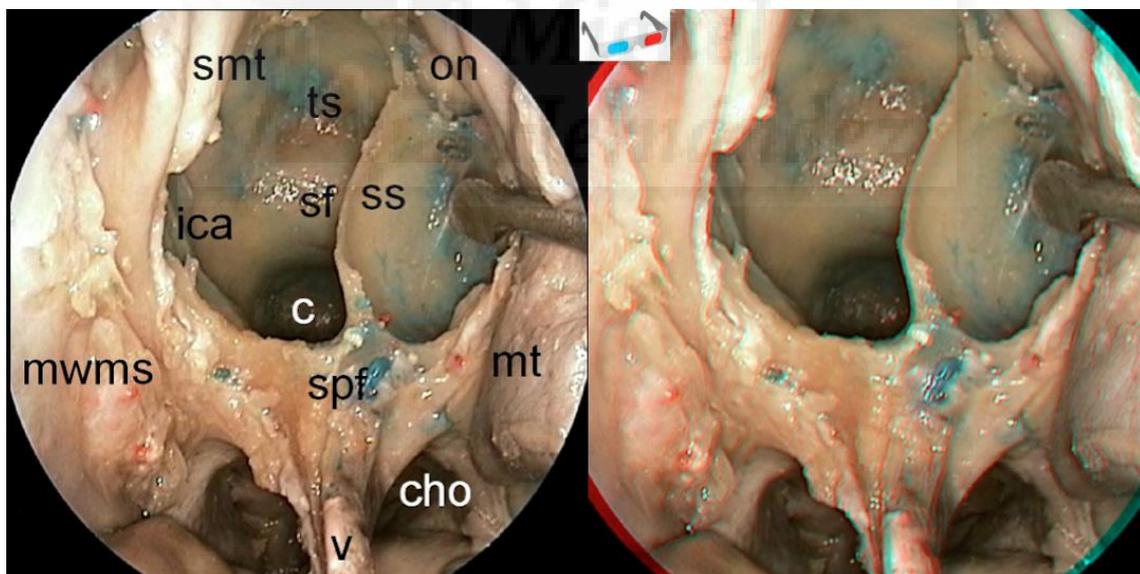


Figura 4. Visión del seno esfenoidal tras la resección del rostrum. Véase la relación del seno con lo cornetes superior y medio, con las coanas y con la pared posteromedial del seno maxilar en el lado derecho.

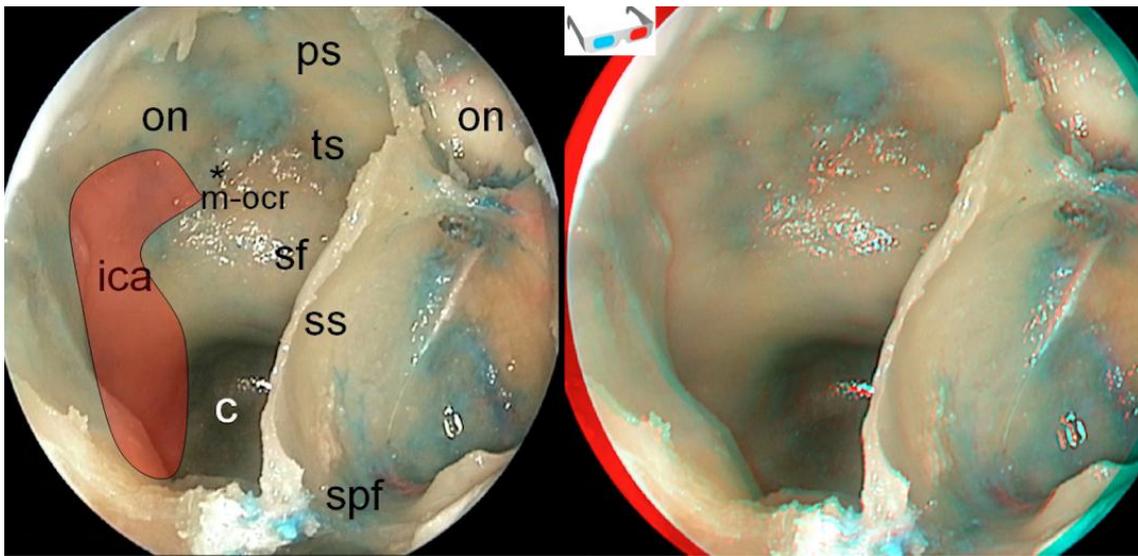


Figura 5. Una esfenoidotomía amplia es crucial para poder distinguir la referencias anatómicas en el interior del seno esfenoidal. Las estructuras vasculonerviosas, así como la glándula hipofisaria marcan relieves más o menos fáciles de reconocer según la neumatización del seno. Este espécimen presenta una aireación selar aunque los recesos optico-carotídeos no se resaltan. Se destaca con el área en rojo el recorrido de la arteria carótida interna derecha en sus segmentos paraclival, paraselar y paraclinoideos (de abajo a arriba). Con un asterisco (*) aparece una referencia crucial en el abordaje a la cisterna supraselar, el receso optocarotídeo medial. Un tabique intraesfenoidal con articulación en la arteria carótida izquierda puede verse en esta fotografía.

Abreviaturas figuras 4 y 5: : c: clivus; cho: coana; ica: art. carótida interna; m-ocr: receso óptico-carotídeo medial; mt: cornete medio; mwms: pared posteromedial del seno maxilar; on: nervio óptico; ps: planum esfenoidal; sf: suelo selar; smt: cornete supremo; so: ostium

esfenoidal; spf: suelo del seno esfenoidal; ss: septum intraesfenoidal;
st: cornete superior; ts: tubérculo selar; v: vómer.

C) TRANSELAR-PARASELAR-SUPRASELAR

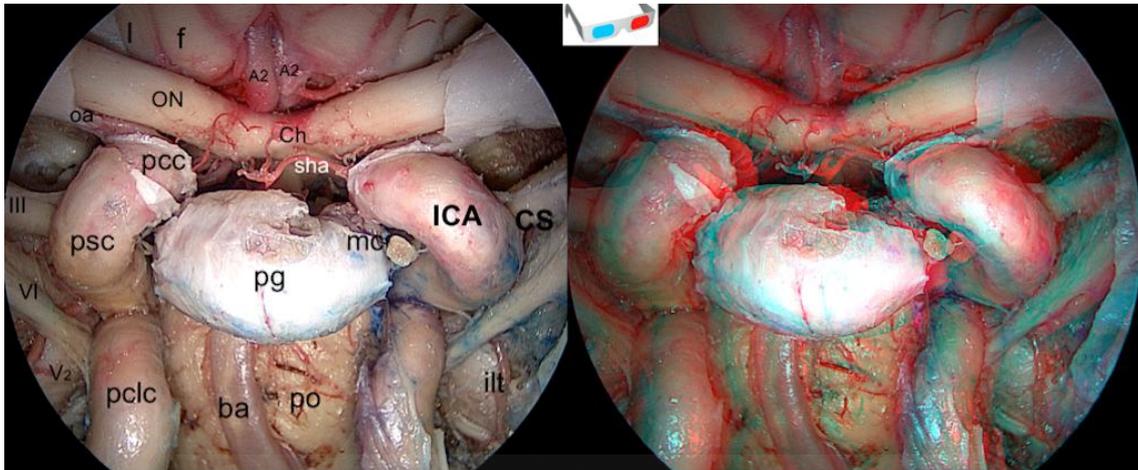


Figura 6. El objetivo de esta disección es mostrar las regiones selar, paraselar y supraselar incluyendo la pared medial de ambos senos cavernosos tras el fresado de la silla turca, el tubérculo selar, la pared lateral del seno esfenoidal y la porción superior del clivus. La glandula pituitaria y ambas carótidas desde su porción paraclival hasta su porción paraclinoidea quedan expuestas. Se puede comprobar el recorrido de los nervios ópticos y sus arterias oftálmicas hacia las respectivas órbitas. Los dos anillos derales (proximal y distal) que delimitan la porción paraclinoidea de las arteria carótidas han sido disecadas. Tras la extirpación de la capa dural que envuelve el seno cavernoso se exponen los nervios III y VI. Se ha preservado la apófisis clinoides media del lado izquierdo para demostrar su relación con la hipófisis medialmente y el seno cavernoso lateralmente. Véase como no coincide con el receso optocarotideo medial, quedando éste superomedial a ésta. En la región supraselar se puede identificar la

salida de las arterias hipofisarias superiores desde ambas carótidas en su porción oftálmica, incluyendo en su irrigación la porción anteroinferior del quiasma óptico. Se aprecia además la cisura interhemisférica con la entrada de ambas A2 en su interior.

Abreviaturas figura 6 : ba: arteria basilar; ch: quiasma; cs: seno cavernoso; f: lóbulo frontal; ICA: Art. Carótida Int.; ilt: tronco inferolateral; mc: clinoides media; oa: Art. oftálmica; on: nervio óptico; pcc: porción paraclinoidea de la arteria carótida; pclc: porción paraclival de la arteria carótida; pg: hipófisis; po: protuberancia; psc: porción paraselar de la arteria carótida; sha: arteria hipofisaria superior;



D) RETROSELAR-RETROCLIVAL INTRADURAL

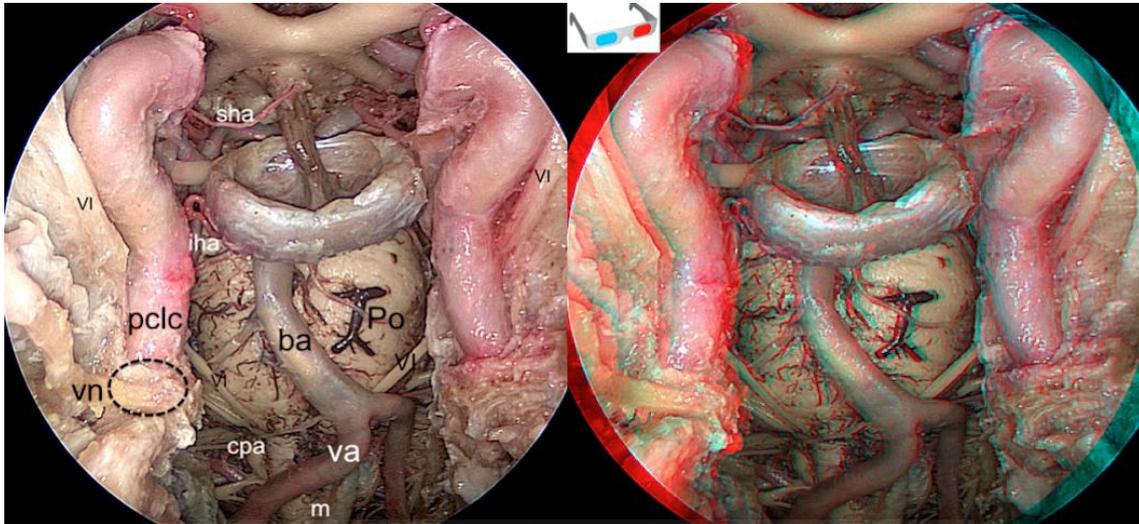


Figura 7. Visión endonasal global de la base del cráneo una vez fresado el seno esfenoidal por completo, el clivus y extirpada la duramadre. Puede visualizarse el recorrido de las carótidas desde su porción lacerum (área discontinua) hasta la porción oftálmica. Véase la salida de las arterias hipofisarias superior e inferior. El fondo de la imagen muestra el troncoencéfalo en su porción pontina y bulbar con la salida de los pares craneales. La imagen resulta especialmente ilustrativa del recorrido del VI par desde la unión ponto-bulbar hasta su entrada en el seno cavernoso. Se puede apreciar la relación crucial del nervio vidiano con la porción lacerum de la arteria carótida. Aunque no es un objetivo habitual de este abordaje, ambos ángulos pontocerebelosos y su contenido vasculonervioso pueden ser visualizados.

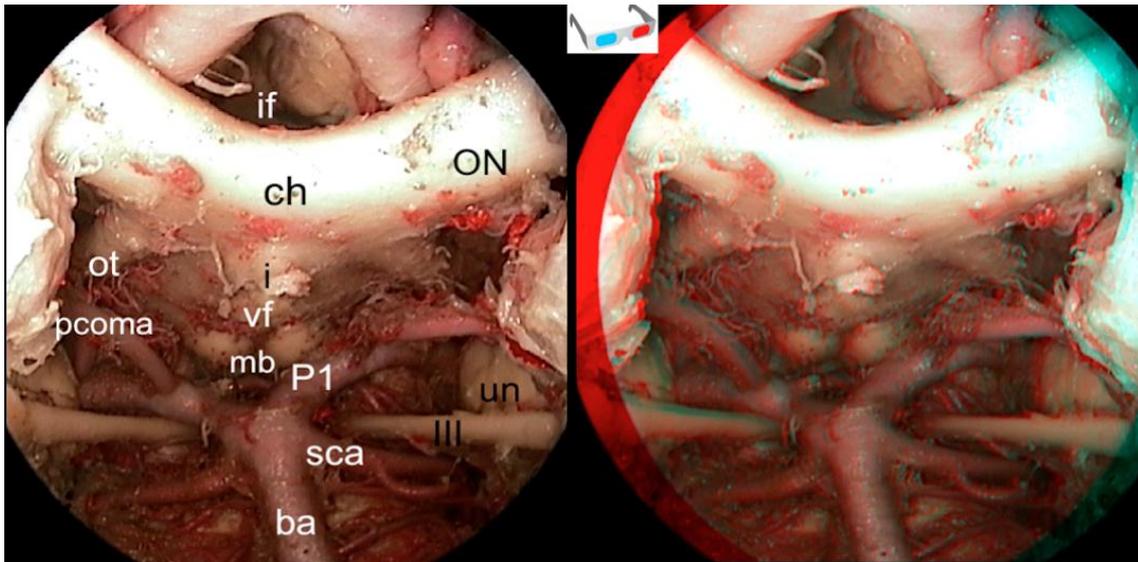


Figura 8. Visión del espacio retroselar y retroclival superior tras resección de la glándula hipofisaria que nos expone las estructuras basales del diencéfalo y los componentes posteriores del polígono de Willis. La imagen ilustra la relación del III par craneal con P1, art. cerebelosa superior y arteria comunicante posterior, así como con el uncus del lóbulo temporal.

Abreviaturas figuras 7 y 8: : ba: arteria basilar; ch: quiasma; cpa: ángulo pontocerebeloso; i: infundíbulo hipofisario; ica: Art. Carótida Int.; if: cisura interhemisférica; iha: arteria hipofisaria inferior; m: bulbo raquideo; mb: cuerpos mamilares; on: nervio óptico; ot: tracto óptico; pcl: arteria carótida porción paraclival; pcoma: art. comunicante posterior; po: protuberancia; sca: arteria cerebelosa superior; sha: arteria hipofisaria superior; u: uncus; va: arteria vertebral; vf: suelo del III ventrículo; vn: nervio vidiano.

Discusión

La visión estereoscópica o tridimensional constituye una característica propia de los primates que se basa en la adquisición simultánea de dos imágenes desde puntos de vista ligeramente diferentes de forma que el cerebro construye automáticamente la imagen tridimensional. Esta capacidad es la que nos permite la percepción de la profundidad. Con la visión monocular también es posible diferenciar la profundidad, pero siempre será basándonos en aspectos como el conocimiento previo del tamaño, situación, movimiento del objeto visualizado o identificación de sombras (3,4). La reproducción de imágenes con técnica estereoscópica es algo estandarizado desde hace más de un siglo. Su uso para la exposición de películas o fotografías de carácter lúdico es de sobra conocido.

Entre las técnicas más usadas en la actualidad se encuentran la técnica anaglífica y la basada en la luz polarizada. Sin entrar en detalles técnicos ambas requieren el mismo procedimiento para obtener los pares de imágenes. Se trata de la adquisición de éstas con una separación entre ellas que simule la distancia interpupilar. La diferencia la encontramos en el modo en que conseguimos que cada ojo del espectador pueda percibir de forma selectiva su imagen correspondiente sin percibir la otra. El método anaglífico lo consigue mediante la modificación de colores de la imagen de modo que por cada ocular de la gafa diseñada con un filtro de color (papel celofán) sólo se perciba esa imagen y no la otra. El método de luz polarizada se basa, sin embargo, en la proyección de la imagen a través de un filtro que modifica la longitud de onda de la luz (“polarización”) y que tras reflejar en una pantalla especial es percibida a través del ocular de la

gafa que dispone de un nuevo filtro que la seleccionará para llegar a ese ojo. No cabe duda que el método más preciso y que permite una visualización de mayor calidad es el de luz polarizada (5). Aunque la percepción de profundidad puede ser equiparable, la conservación de los colores originales es óptima con éste último. Sin embargo, este método no es aplicable de modo directo desde una pantalla convencional de ordenador o papel al espectador ya que requiere un procesamiento de la luz que obliga a su emisión con proyectores y filtros intermedios. En cuanto al método de obtención de imágenes, la endoscopia plantea un reto no fácil de solucionar. Cuando usamos un microscopio o una cámara fotográfica, la separación necesaria entre cada par de imágenes es relativamente sencilla de calcular ya que equivale a la distancia interpupilar. Sin embargo, en la endoscopia endonasal, la obtención de imágenes se debe realizar dentro de la cavidad nasal con lo cual la distancia entre dos fotografías es muy difícil de calcular (2-3 mm habitualmente) y requiere habitualmente la obtención de varias capturas de prueba que posteriormente deben ser apareadas en el programa informático que las edita. En nuestro trabajo los abordajes se realizan con sujeción manual del endoscópico, lo cual añade dificultad a la hora de obtener los pares adecuados de fotos.

La visión estereoscópica aplicada al conocimiento de la anatomía y la cirugía es un hecho aplicado por otros autores desde hace muchos años. (6,7,8). Aunque en el campo de la neurocirugía y la neuroanatomía se han publicado trabajos anatómicos en esta técnica (9,10,11-13,14,15), ninguno de ellos, bajo nuestro conocimiento, ha sido aplicado a la endoscopia de la base de cráneo. No debemos confundir la estereoscopia con la reconstrucción de modelos tridimensionales de estructuras anatómicas o abordajes simulados que

utilizan herramientas de perspectiva finalmente representadas en formato bidimensionalmente en pantalla. (16,17,18).

La cirugía actualmente busca cada vez más el acceso a las regiones de interés por vías naturales. Tal es el caso del abordaje endonasal endoscópico a la base de cráneo. Estas técnicas requieren un conocimiento exhaustivo de la localización y profundidad exacta de las estructuras anatómicas. A pesar de las innumerables ventajas que la endoscopia ofrece respecto a otras técnicas de visualización quirúrgicas, la imagen que nos ofrece es bidimensional frente a la imagen tridimensional del microscopio. Consideramos que puede ser de gran ayuda la divulgación de la anatomía con técnica tridimensional para facilitar así la comprensión de estos complejos abordajes. Además, no cabe duda que la percepción del cuerpo humano de un modo más cercano a la realidad ensalza aún más su inmensa belleza.

Conclusión

La base de cráneo esta compuesta por complejas estructuras óseas y neurovasculares. La experiencia con la disección en cadáver es crucial para comprender la anatomía y desarrollar habilidades quirúrgicas. La exposición de la anatomía en 3D representa una herramienta útil para comprender la compleja disposición de las estructuras de la base de cráneo desde su visión endonasal endoscópica.

Bibliografía

1. Weingaertner T, Hassfeld S, Dillman R: Virtual jaw: a 3D simulation for computer assisted surgery and education, in Westwood JD, Hoffman HM, Stredney D, et al (eds): *MedicineMeets Virtual Reality*. Amsterdam: IOS Press, 1998, pp 329–335
2. Thiel W. The preservation of the whole corpse with natural color. *Ann Anat*. 1992 Jun; 174(3): 188-95.

3. Solso RL: Cognition and Visual Arts. Cambridge: MIT Press, 1994.
4. Wolfgram DE: Aventuras em 3D. São Paulo: Berkeley Brasil Editora, 1993.
5. Meneses MS, Cruz AV, Castro IA, Pedrozo AA. Stereoscopic neuroanatomy: comparative study between anaglyphic and light polarization techniques *Arq Neuropsiquiatr* 2002;60(3-B):769-774.
6. Bassett DL: A Stereoscopic Atlas of Human Anatomy. Portland, OR: Sawyer, 1961.
7. Chase RA: A Stereoscopic Atlas of Human Anatomy, The Bassett and Gruber Legacy. Borger, The Netherlands: 3DBook Productions, 1994
8. Ferwerda JG: The World of 3-D. Borger, 3-D Book Productions, 2003, ed 2, pp. 210–221.
9. Bento RF, Ribas GC, Sanchez TG, et al. Demonstração Tridimensional da Anatomia Cirúrgica do Osso Temporal. *Arq Int Otorrinolaringol*. 2000, 4(2):43-47.
10. Fernández-Miranda JC, Rhoton AL Jr, Alvarez-Linera J, Kakizawa Y, Choi C, de Oliveira EP. Three-dimensional microsurgical and tractographic anatomy of the white matter of the human brain. *Neurosurgery*. 2008 Jun;62(6 Suppl 3):989-1026; discussion 1026-8.
11. Henn JS, Lemole GM Jr, Ferreira MA, Gonzalez LF, Schornak M, Preul MC, Spetzler RF. Interactive stereoscopic virtual reality: a new tool for neurosurgical education. Technical note. *J Neurosurg*. 2002 Jan;96(1):144-9.
12. Isolan GR, Rowe R, Al-Mefty O. Microanatomy and surgical approaches to the infratemporal fossa: an anaglyphic three-dimensional stereoscopic printing study. *Skull Base*. 2007 Sep;17(5):285-302.
13. Kraus GE, Bailey GJ: Microsurgical Anatomy of the Brain: A Stereo Atlas. Baltimore: Williams & Wilkins, 1994.
14. Poletti CE, Ojemann RG: Stereo Atlas of Operative Microneurosurgery. St. Louis: Mosby, 1985.
15. Ribas GC, Bento RF, Rodrigues AJ Jr. Anaglyphic three-dimensional stereoscopic printing: revival of an old method for anatomical and surgical teaching and reporting. *J Neurosurg*. 2001 Dec;95(6):1057-66.
16. Mahoney DP: Brain storm. *Computer Graphics World* 21: 79–88, July, 1998.
17. Satava RM: The virtual surgeon. *The Sciences* 38:34–39, 1998.
18. Rhoton AL Jr: Cranial Anatomy and Surgical Approaches. Schaumburg, Lippincott Williams & Wilkins, 2003.



