



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Metodología de Evaluación de Riesgo en la
Planificación de Trayectorias en Cirugía
Mínimamente Invasiva Tipo Cerradura
usando Algoritmos Genéticos**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Doctorado en Ciencias de la Computación

Presenta:

M.I.S.D. Iván Villanueva Naquid

Asesor:

Dr. Carlos Soubervielle Montalvo

Asesor:

Dra. Ruth M. Aguilar Ponce

San Luis Potosí, S. L. P.

Octubre de 2019





UASLP

Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA

17 de enero de 2019

**M.I. IVÁN VILLANUEVA NAQUID
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Carlos Soubervielle Montalvo y Ruth M. Aguilar Ponce**, Asesor y Co-asesor de la Tesis que desarrollará Usted con el objeto de obtener el Grado de **Doctor en Ciencias de la Computación**, me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 17 de enero del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Metodología de evaluación de riesgo en la planificación de trayectorias en cirugía mínimamente invasiva tipo cerradura usando algoritmos genéticos”

Introducción.

1. Estado del Arte en Planeación de Trayectorias Quirúrgicas.
2. Contexto de la Investigación.
3. Evaluación de Riesgo en Trayectorias Quirúrgicas Intracraneales.
4. Búsqueda de Trayectorias con Menor Riesgo.
5. Pruebas Experimentales y Evaluación de Resultados.

Conclusiones.

Referencias.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E



**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR.**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*etn.

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

“2019, aniversario 160 de la fundación del Instituto Científico y Literario de San Luis Potosí”

©2019 – Iván Villanueva Naquid
ALL RIGHTS RESERVED.

DEDICATORIA

A DIOS, QUIÉN SIEMPRE HA ESTADO A MI LADO Y RECORRIDO LOS DIVERSOS CAMINOS POR LOS QUE HE TRANSITADO, OTORGÁNDOME LA FORTALEZA PARA CONTINUAR SIEMPRE MI CAMINO, EL CONSUELO PARA NO RENDIRME EN LAS ADVERSIDADES, LA PACIENCIA PARA MANTENER LA CALMA A PESAR DE QUE LOS SUCEOS QUE SE PRESENTEN ESTÉN FUERA DE LO PLANEADO Y LA HUMILDAD PARA ACEPTAR LAS DIFERENCIAS CON LAS DEMÁS PERSONAS. GRACIAS POR ESTAR PRESENTE NO SOLO EN ESTA ETAPA TAN IMPORTANTE DE MI VIDA, SINO EN TODO MOMENTO, OFRECIÉNDOME LO MEJOR Y BUSCANDO LO MEJOR PARA MI PERSONA. ,

A FÁTIMA, MI ESPOSA AMADA, QUIÉN ES PARTE IMPORTANTE NO SOLO DE ESTE TRABAJO, SINO DE MI VIDA, BRINDÁNDOME EL APOYO EN LOS MOMENTOS MÁS DIFÍCILES, EL ÁNIMO EN LA BÚSQUEDA POR MEJORAR Y ALCANZAR MIS METAS Y EL GRAN AMOR CON EL QUE VIVIMOS TODOS LOS DÍAS. ÉSTA META LA CONSEGUÍ GRACIAS A TI, QUE ME ANIMASTE A RETOMAR ESTE CAMINO. JUNTOS SEGUIREMOS CONSIGUIENDO NUESTRAS METAS CAMINANDO POR LA VIDA TOMADOS DE LA MANO.,

*”SI QUIERES COSECHAR POR UN DIA, PLANTA FLORES.
SI QUIERES COSECHAR POR AÑOS, PLANTA ARBOLES,
SI TU PLAN ES PARA TODA LA ETERNIDAD, PLANTA IDEAS.”*

JESUS, RECORDTV

AGRADECIMIENTOS

A MI ASESOR, DR. CARLOS SOUBERVIELLE MONTALVO, QUIÉN ME BRINDÓ SU APOYO EN MÚLTIPLES CUESTIONES DEL PROGRAMA DE DOCTORADO.

A MI COASESORA, DRA. RUTH M. AGUILAR PONCE, QUIÉN ME APOYÓ EN UN MOMENTO COMPLICADO OTORGÁNDOME CONFIANZA Y MOTIVACIÓN PARA MEJORAR MI TRABAJO.

AL DR. CESAR A. PUENTE MONTEJANO Y LA DRA. MARCELA MEJIA CARLOS, QUIENES SIEMPRE SE MOSTRARON DISPUESTOS A APOYARME A PESAR DE CUALQUIER ADVERSIDAD.

UN ESPECIAL AGRADECIMIENTO AL DR. SAÚL TOVAR ARRIAGA, QUIÉN ES UN MARAVILLOSO EJEMPLO DE QUE EL CONOCIMIENTO Y LA HUMILDAD PUEDEN COEXISTIR. GRACIAS POR MOSTRARME LA PASIÓN POR LA INVESTIGACIÓN Y EL HAMBRE POR EL CONOCIMIENTO. ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN COMENZÓ GRACIAS A SU GUÍA Y A SU AMPLIA EXPERIENCIA, POR LO QUE AHORA QUE ESTE TRABAJO CULMINA, ES UN HONOR PARA MI QUE FORME PARTE DE EL MISMO.

GRACIAS AL DR. ALVIN V. DE LEÓN QUIEN ME PROPORCIONÓ HERRAMIENTAS NECESARIAS Y ME APOYÓ EN LA COMPRESIÓN DE MÚLTIPLES CUESTIONES Y FUE UNA GRAN MOTIVACIÓN PARA MI.

A TODOS LOS INVOLUCRADOS EN EL DESARROLLO DE ESTE TRABAJO. DR. JAIME G. TORRES CORZO, QUIÉN FUE PARTE FUNDAMENTAL EN EL PROCESO DE VALIDACIÓN, ACLARANDO TODAS MIS DUDAS Y EXPLICÁNDOME PACIENTEMENTE LA REALIZACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS. DE IGUAL MANERA, AGRADEZCO A SU EQUIPO DE TRABAJO, EN ESPECIAL AL DR. MARIO ALBERTO ISLAS AGUILAR QUIÉN ME BRINDO MATERIAL DE INVESTIGACIÓN Y ME AUXILIO EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO.

A MI MAMÁ, QUIÉN ADEMÁS DE DARME LA VIDA, ME ENSEÑÓ A SER COMO SOY.

UN AGRADECIMIENTO A TODO EL PERSONAL DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ, ESPECIALMENTE AL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO, QUIENES SIEMPRE ESTUVIERON DISPUESTOS EN LOS TRAMITES QUE DEBÍA REALIZAR.

A DORYTO, BINGO, OREO, DORY, NASHO, LAIKA, ROX, QUIENES ME ACOMPAÑAN EN TODAS LAS ACTIVIDADES QUE HAGO, ESTANDO SIEMPRE PRESENTES EN ESAS LARGAS JORNADAS DE TRABAJO, LLENÁNDOME DE CARIÑO Y ENTUSIASMO.

RESUMEN

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS EN CIRUGÍA MÍNIMAMENTE INVASIVA TIPO CERRADURA USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

LA EVALUACIÓN PREOPERATIVA EN PROCEDIMIENTOS QUIRÚRGICOS INTRACRANEALES ES UNA ACTIVIDAD DE GRAN IMPORTANCIA PARA QUE EL NEUROCIRUJANO PUEDA CONSIDERAR TODOS LOS PUNTOS DE INTERÉS EN CUANTO A LA INTERVENCIÓN A REALIZAR. UNO DE LOS PRINCIPALES PUNTOS A VERIFICAR ES LA PLANEACIÓN DE LA TRAYECTORIA MÁS SEGURA EN LA QUE SE INTRODUCIRÁN LOS INSTRUMENTOS QUIRÚRGICOS EN LA CAVIDAD CRANEAL RUMBO AL ÁREA OBJETIVO DE INTERÉS DENTRO DEL CEREBRO.

UNA CORRECTA PLANEACIÓN DE LA TRAYECTORIA PUEDE REDUCIR COMPLICACIONES COMO HEMORRAGIAS INTRACRANEALES Y DAÑO NEUROLÓGICO TEMPORAL O PERMANENTE. DE IGUAL MANERA, EL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE LOS PACIENTES SERÁ MENOR DEBIDO A UN MENOR DAÑO Y UNA EXPOSICIÓN CEREBRAL EN MENORES TIEMPOS.

EN EL PRESENTE TRABAJO SE DESARROLLA UNA NUEVA TÉCNICA QUE PUEDE SER EMPLEADA EN PROCESOS PREOPERATIVOS TOMANDO COMO REFERENCIA LAS IMÁGENES MÉDICAS DEL PACIENTE OBTENIDAS A PARTIR DE TÉCNICAS DE IMAGENOLOGÍA. A PARTIR DE ESTAS IMÁGENES, SE DEFINE UN MAPA DE RIESGO MEDIANTE UN PROCESO DE ETIQUETADO, EN EL QUE SE ASIGNA UN VALOR DE RIESGO A CADA VOXEL EN EL CEREBRO, CONSIDERANDO LA SUMA DE N VALORES MÁXIMOS DE RIESGO, LOS VALORES DE RIESGO SON OBTENIDOS MEDIANTE UN PROCESO DE SEGMENTACIÓN DE ESTRUCTURAS CEREBRALES DEFINIDAS COMO PUNTOS DE RIESGO POR EL NEUROCIRUJANO.

EL MAPA DE RIESGO OBTENIDO POR LA METODOLOGÍA PROPUESTA EN ESTE TRABAJO, BRINDA

INFORMACIÓN RELEVANTE EN LA CUAL SE CONSIDERAN LOS RIESGOS DE MÚLTIPLES VOXELES DE RIESGO CERCANOS A CADA VOXEL EN EL CEREBRO.

CON EL MAPA DE RIESGO OBTENIDO, SE REALIZA LA BÚSQUEDA POR LAS TRAYECTORIAS MAS SEGURAS EMPLEANDO ALGORITMOS GENÉTICOS, EN DONDE SE TIENE QUE SELECCIONAR LAS TRAYECTORIAS CON MENOR RIESGO ENTRE TODAS LAS LINEAS RECTAS QUE PUEDEN SER TRAZADAS A PARTIR DE UN ÁREA DE ENTRADA HASTA UN ÁREA OBJETIVO.

EL PROCESO DE BÚSQUEDA EMPLEANDO ALGORITMOS GENÉTICOS RESULTA EN TRAYECTORIAS SEGURAS QUE PUEDEN SER EMPLEADAS EN PROCEDIMIENTOS QUIRÚRGICOS.

PARA VALIDAR LOS RESULTADOS, UN GRUPO DE NEUROCIRUJANOS EXPERTOS CALIFICAN LAS TRAYECTORIAS COMO ADECUADAS PARA EL DESARROLLO DE UNA INTERVENCIÓN QUIRÚRGICA. LOS EXPERTOS DEFINIERON TRAYECTORIAS DE FORMA MANUAL, LAS QUE FUERON COMPARADAS CON LAS TRAYECTORIAS OBTENIDAS POR EL MÉTODO DESARROLLADO. LAS TRAYECTORIAS OBTENIDAS SON MUY CERCANAS A LAS DEFINIDAS COMO IDEALES POR EL GRUPO DE EXPERTOS, E INCLUSO, AL MEDIR CARACTERÍSTICAS COMO LONGITUD DE LA TRAYECTORIA Y CERCANÍA CON LAS ESTRUCTURAS DE RIESGO, LAS TRAYECTORIAS OBTENIDAS POR LA METODOLOGÍA PROPUESTA ENTREGA MEJORES RESULTADOS.

POR LO TANTO SE PUEDE CONCLUIR QUE SE DESARROLLÓ UNA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGO EN CUANTO A PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS QUIRÚRGICAS CEREBRALES QUE DA COMO RESULTADO UN MAPA DE RIESGO MAS SUAVE Y MAS PRECISO QUE LOS DESARROLLADOS EN TRABAJOS QUE EMPLEAN METODOLOGÍAS DE CALCULO CON MALLAS DE VOXELES O QUE EN SU CALCULO NO CONSIDERAN MÚLTIPLES VOXELES DE RIESGO CERCANOS. EL USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS ACELERA EL PROCESO DE BÚSQUEDA POR LA TRAYECTORIA MÁS SEGURA, ADQUIRIENDO UN CONJUNTO DE TRAYECTORIAS QUE SON ADECUADAS PARA EMPLEARSE EN INTERVENCIONES QUIRÚRGICAS.

PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

JOURNAL CITATION REPORTS

- **RISK ASSESSMENT METHODOLOGY FOR TRAJECTORY PLANNING IN KEYHOLE NEUROSURGERY USING GENETIC ALGORITHMS.**

IVÁN VILLANUEVA NAQUID, CARLOS SOUBERVIELLE MONTALVO, RUTH M. AGUILAR PONCE, SAÚL TOVAR ARRIAGA, JUAN C. CUEVAS TELLO, CESAR A. PUENTE MONTEJANO, MARCELA MEJIA CARLOS Y JAIME G. TORRES CORZO.

INTERNATIONAL JOURNAL OF MEDICAL ROBOTICS AND COMPUTER ASSISTED SURGERY (IJMRCAS)

ACEPTADO

24/SEPTIEMBRE/2019

- **GPU IMPLEMENTATION OF RISK LABELING TECHNIQUES FOR TRAJECTORY PLANNING IN BRAIN SURGERY.**

SCIENTIFIC PROGRAMMING

EN PROCESO

DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

- **TECNOLOGÍAS DE ASISTENCIA EN CIRUGÍA PARA EVALUACIÓN DEL RIESGO..**

IVÁN VILLANUEVA NAQUID, CARLOS SOUBERVIELLE MONTALVO, RUTH M. AGUILAR PONCE.

REVISTA UNIVERSITARIOS POTOSINOS.

ACEPTADO

23/SEPTIEMBRE/2019

CONGRESOS NACIONALES

- **DISEÑO DE UN SISTEMA APLICABLE A LA TOMA DE DECISIONES EN CIRUGÍA INTRACRANEAL TIPO CERRADURA..**

6° CONGRESO NACIONAL DE IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA.

PRESENTACIÓN DE POSTER

JUNIO, 2018

Índice general

Introducción	1
Planteamiento del Problema	2
Justificación	4
Objetivos de la Tesis	5
Organización de la Tesis	6
1 Estado del Arte en la Planeación de Trayectorias Quirúrgicas	7
1.1. Estructuras Cerebrales	8
1.2. Trabajos Relacionados	9
2 Contexto de la Investigación	19
2.1. Cirugía Mínimamente Invasiva	19
2.1.1. Cirugía mínimamente invasiva tipo cerradura	21
2.2. Computación de Alto Rendimiento (HPC)	24
2.2.1. Arquitecturas Heterogéneas	25

2.3.	Cómputo Evolutivo	28
2.3.1.	Algoritmos Genéticos	29
3	Evaluación de Riesgo en Trayectorias Quirúrgicas Intracraneales	31
3.1.	Adquisición de Imágenes Médicas	32
3.2.	Herramientas de Desarrollo de Aplicaciones de Imágenes Médicas interactivas (MITK)	33
3.2.1.	Herramientas de Visualización (VTK)	35
3.2.2.	Kit de Herramientas de Segmentación y Registro de Imágenes (ITK)	35
3.3.	Segmentación de Estructuras	37
3.4.	Etiquetado de Riesgo	40
4	Búsqueda de Trayectorias con Menor Riesgo	47
5	Pruebas Experimentales y Evaluación de Resultados	55
5.1.	Experimento de Validación	62
6	Conclusiones y Trabajo Futuro	67
Apéndice A	Instalación de Bibliotecas VTK / ITK en Sistemas Operativos Linux	71
Referencias		75

Índice de figuras

1.1.	Visualización de estructuras cerebrales de importancia. Se incluyen estructuras del diencefalo (tálamo, subtálamo, epitálamo, hipófisis), cerebelo y ventrículos	9
1.2.	Pasos involucrados en el proceso de planeación de trayectorias seguras.	16
2.1.	Corredor quirúrgico mediante cirugía tipo cerradura (Figura obtenida de [1]). a) Craneotomía completa para llegar al objetivo b) Una combinación de varias trepanaciones para ampliar la dimensión del corredor quirúrgico. c) Un solo abordaje tipo cerradura mediante el cual se tiene plena visualización del área objetivo.	22
2.2.	Estructura de Grids, Bloques y Threads de la Arquitectura CUDA.	27
2.3.	Funcionamiento básico de un algoritmo genético.	29
3.1.	Flujo de trabajo en el proceso de planeación de trayectorias quirúrgicas.	32
3.2.	Pantalla de trabajo de las herramientas de trabajo MITK	34
3.3.	Arquitectura de MITK	34
3.4.	Pipeline de Visualización de VTK	36
3.5.	Pipeline de Conexión ITK-VTK	37

3.6.	Histograma de una imagen. a) Imagen procesada. b) Histograma obtenido y selección de umbral en fondo negro. c) Objeto segmentado	39
3.7.	Ejemplo de Cálculo de Riesgo para 2 Voxeles Considerando 2 Estructuras de Riesgo.	42
3.8.	Diagrama de bloques para el cálculo de los k valores máximos.	44
4.1.	Método de generación de trayectorias candidato.	48
4.2.	Implementación de GA en método de búsqueda de trayectorias candidato.	50
5.1.	Imagen Médica del Caso Clínico empleado como experimento. (a) Vista Axial; (b) Vista Sagital; (c) Vista Coronal; (d) Reconstrucción 3D del Cráneo	56
5.2.	Reconstrucción 3D de la segmentación de la superficie craneal. (a) Vista Lateral; (b) Vista Frontal;	57
5.3.	Segmentación de los vasos sanguíneos. (a) Corte axial; (b) Vista superior de la reconstrucción 3D; (b) Vista lateral de la reconstrucción 3D	57
5.4.	Segmentación de los ventrículos. (a) Corte axial; (b) Vista lateral de la reconstrucción 3D; (c) Vista trasera de la reconstrucción 3D	57
5.5.	Reconstrucción 3D del resultado del proceso de segmentación. (a) Vasos sanguíneos y ventrículos; (b) Superficie cerebral con las estructuras de riesgo	58
5.6.	Visualización del área de abordaje (color cyan) y 2 áreas objetivos definidas para dos casos de estudio (color magenta para el caso de colocación de un electrodo y rojo para el acceso a tumor intraventricular). a) Vista Lateral izquierda, b) Vista Frontal, c) Vista Superior	59

5.7.	Distintos cortes axiales del mapa de riesgo obtenido para distintos valores de N . (a) $N = 1$, (b) $N = 5$, (c) $N = 10$, (d) $N = 20$	60
5.8.	Áreas de abordaje propuestas por los neurocirujanos de forma manual.	61
5.9.	Flujo de trabajo realizado en el proceso de validación de la metodología propuesta. . .	63
5.10.	Trayectoria manual seleccionada por los neurocirujanos (color verde) y trayectoria segura obtenida por la metodología propuesta (color magenta). Trayectorias para la colocación de un electrodo en el hipocampo izquierdo a través de la segunda circunvolución temporal izquierda: a) Vista Superior, b) Vista Inferior, c) Vista Lateral Izquierda. Trayectorias para acceder a un tumor en el atrio intraventricular izquierdo: d) Vista Superior, e) Vista Inferior, f) Vista Lateral Izquierda.	64

Índice de tablas

1.1. Comparación de métodos de planeación de trayectorias quirúrgicas	15
5.1. Comparación de trayectorias automáticas y manuales.	65
5.2. Comparación de resultados de la aplicación de algoritmos genéticos y búsqueda exhaustiva.	66
5.3. Trayectorias obtenidas con la metodología equivalente a la propuesta por Shamir et al. [2, 3, 4]	66

Acrónimos

ACO Optimización por Colonia de Hormigas

ACR Colegio Americano de Radiología

BA Optimización por Algoritmo de Abejas

CBVDA Costo del Área Dominante de los Vasos Sanguíneos

CMI Cirugía Mínimamente Invasiva

CSF Líquido Cerebroespinal

CT Tomografía Computarizada

CUDA Arquitectura Unificada de Dispositivos de Cómputo

DICOM Estándar en Imagen Digital y Comunicaciones en Medicina

DTI Imagenología por Tensor de Difusión

ECP Estimulación Cerebral Profunda

fMRI Imagen de Resonancia Magnética Funcional

FPGA Matriz de Compuertas Reconfigurable

GA Algoritmo Genético

GPU Unidad Gráfica de Procesamiento

HPC Computación de Alto Rendimiento

ITK Marco de Desarrollo para Segmentación y Registro de Imágenes

MITK Marco de Desarrollo para Interacción con Imágenes Médicas

MRA Angiografía por Resonancia Magnética

MRI Imágen por Resonancia Magnética

MRI Algoritmo Genético con Operador Elitista Basado en un Ordenamiento No-Dominado

OPENCV Librería de Código Abierto para Visión por Computador

PET Tomografía por Emisión de Positrones

PSO Optimización por Enjambre de Partículas

SPECT Tomografía Computarizada por Emisión de Fotón Único

TCL Lenguaje de Herramientas de Comando

US Imagen por Ultrasonido

VOXEL Pixel Volumétrico

VTK Marco de Desarrollo para Visualización de Imágenes

WMT Tractografías de Materia Blanca

Glosario de Terminos

Abordaje Quirúrgico Vía de acceso quirúrgico, disección específica por medio de la cual se expone un órgano o una estructura en la cirugía

Abordaje Tipo Cerradura Abordaje cuya principal filosofía es realizar una incisión mínima y ocasionar una mínima retracción cerebral

Abordaje Interhemisférico Se utiliza para acceder a lesiones que llegan a la línea media, que están ubicadas profundamente en relación con la corteza pero por encima del cuerpo calloso

Absceso Cerebral Acumulación de células inmunitarias, pus y otros materiales en el cerebro, generalmente a raíz de una infección bacteriana o micótica.

Aneurisma Cerebral Ensanchamiento o abombamiento anormal de una parte de una arteria debido a debilidad en la pared del vaso sanguíneo

Angiografía por resonancia magnética Técnica no invasiva en la que se utiliza un campo magnético poderoso, ondas de radio y una computadora para evaluar los vasos sanguíneos y ayudar a identificar anomalías

Atlas Cerebral Archivo que consta de múltiples imágenes del cerebro en el que expertos han identificado estructuras anatómicas o funcionales. Estas imágenes se conocen como cortes y pueden ser de tres tipos: axial, coronal y sagital, dependiendo del plano de adquisición

Catéter Ommaya Pequeño dispositivo de plástico tipo domo con una pequeña sonda. El depósito se coloca debajo de la piel en el cuero cabelludo. Se usa en el tratamiento para el cáncer. Permite que la medicina se inyecte directamente al cerebro y la médula espinal

Circonvoluciones Cerebrales Elevaciones de la superficie del cerebro producidas al plegarse la corteza sobre sí misma y separadas por las cisuras o surcos

Cirugía estereotáxica Técnica que permite localizar exactamente un punto dentro de la cavidad craneal. Requiere la colocación de una estructura externa (halo de estereotaxia) que se fija a la cabeza del paciente y constituye un marco de referencia para las coordenadas ortogonales

Cirugía Guiada por Imágenes Procedimiento quirúrgico en el que el cirujano tiene información preoperatoria con base en técnicas de procesamiento de imágenes del paciente. así como intraoperatoria empleando técnicas de realidad aumentada, mejorando la orientación, precisión y seguridad del paciente

Cirugía Mínimamente Invasiva Tipo Cerradura Técnica en la que se reduce la exposición del tejido al minimizar el tamaño de la craneotomía, de tal forma que empleando mecanismos de visión se puede tener la visión completa del área objetivo. Conocida en inglés como Keyhole neurosurgery.

Cirugía Mínimamente Invasiva Conjunto de técnicas que sirviéndose de un instrumental muy específico evitan casi totalmente las lesiones inherentes a la vía de acceso quirúrgico reduciendo la morbilidad operatoria y el periodo de convalecencia al tiempo que consiguen unos resultados superponibles o incluso mejores a los que se obtienen con la cirugía abierta convencional

Contornos activos Técnica de segmentación en la que se emplean curvas cerradas (para imágenes 2D) o superficies embebidas (en el caso de imágenes 3D) que evolucionan para definir tareas de segmentación en las imágenes

Corredor Quirúrgico Trayecto a partir del cual el neurocirujano tiene un camino desde el cráneo hasta alguna estructura cerebral de interés.

Craneotomía Operación quirúrgica en que parte del hueso del cráneo se extrae con la finalidad de exponer el cerebro y las estructuras del sistema nervioso central. El colgajo óseo se retira temporalmente y al final de la cirugía se vuelve a colocar para darle nueva protección al cerebro y sus estructuras

Cuerpo calloso cerebral El cuerpo calloso es la estructura que se encuentra en lo profundo del cerebro y que conecta los hemisferios cerebrales derecho e izquierdo, coordinando las funciones de ambos

Discinesia Trastorno involuntario en el que se presentan movimientos excesivos o alterados de una o mas partes del cuerpo

Estimulación Cerebral Profunda Procedimiento quirúrgico usado para tratar una variedad de síntomas neurológicos invalidantes, más comúnmente los síntomas debilitantes de la enfermedad de Parkinson, tales como el temblor, la rigidez, el agarrotamiento, el movimiento lento y los problemas para caminar. Consiste en la implantación quirúrgica de un dispositivo médico operado por una batería llamado neuroestimulador para enviar estimulación eléctrica a áreas específicas del cerebro que controlan el movimiento, bloqueando las señales nerviosas anormales que causan el temblor y los síntomas de la enfermedad de Parkinson

Etiquetado de riesgo Asignación de un valor de riesgo a una parte específica de una estructura tomando en consideración la importancia de dicha estructura, así como la cercanía con otras estructuras

Hidrocefalia Acumulación anormal del líquido cerebroespinal en las cavidades cerebrales llamadas ventrículos. El exceso de líquido aumenta el tamaño de los ventrículos y ejerce presión sobre el cerebro

Lobulo Cerebral Área de la corteza cerebral delimitada por cisuras primarias. Anatómicamente el cerebro humano se divide en 4 lóbulos: frontal, temporal, parietal y occipital

Neurocirugía Especialidad de la medicina que se dedica al estudio y tratamiento de las lesiones y enfermedades del cerebro, columna vertebral y nervios periféricos que requieren o pueden requerir un tratamiento quirúrgico en algún momento de su evolución

Neurocisticercosis Infección parasitaria del sistema nervioso central por las larvas de la Taenia solium

Neuroimagen Toda aquella imagen que se puede obtener de estructuras neurales mediante técnicas radiológicas

Parkinson enfermedad producida por un proceso neurodegenerativo multisistémico que afecta al sistema nervioso central lo que provoca la aparición de síntomas motores y no motores. Es crónica y afecta de diferente manera a cada persona que la padece

Registro de imágenes Técnica en la que se superponen varias imágenes de la misma escena adquiridas en diferentes instantes de tiempo o distintos puntos de vista, ajustando las imágenes para poder obtener una imagen integrada con la información de todo el conjunto de imágenes superpuestas

Resección Extirpación de tejido a través de pequeñas incisiones, separando total o parcialmente zonas de tejido enfermo

Segmentación de imágenes Partición de un conjunto de datos en una imagen en conjuntos de datos cuyos elementos tienen campos comunes y propiedades cohesivas

Sistema de guía de arco Sistema estereotáxico empleado para la realización de cirugías estereotáxicas, se compone de varias partes fundamentales como el arco, la guía y el sistema de fijación

Surco Cerebral Hendidura de la superficie de la corteza cerebral situada entre las circunvoluciones cerebrales y los lóbulos cerebrales

Taxonomía de Flynn

Trepanación Intervención quirúrgica que se realiza sobre el cráneo, en el que se realiza la perforación de una sección del mismo con el objetivo de ingresar a un área cerebral específica.

Tumor Masa anormal de tejido que aparece cuando las células se multiplican más de lo debido o no se destruyen en el momento apropiado. Los tumores son benignos (no cancerosos) o malignos (cancerosos). También se llama neoplasia

Vaso sanguíneo Estructura tubular a través del cual la sangre circula por el cuerpo. Los vasos sanguíneos forman una red de arterias, arteriolas, capilares, vénulas y venas

Ventrículo cerebral Cavidad del cerebro por la que circula el líquido cefalorraquídeo. Hay 4 ventrículos cerebrales: Dos ventrículos laterales situados a lo largo de cada hemisferio; un tercer ventrículo delgado y aplanado situado entre los tálamos; un cuarto ventrículo situado entre el tronco cerebral y el cerebelo

Voxel Pixel volumétrico, un punto en una imagen en 3 dimensiones representado por sus coordenadas (x, y, z)

En algún lugar algo increíble está esperando a ser descubierto.

Carl Sagan

Introducción

La investigación que se presenta a lo largo del documento, se refiere al tema de minimización de riesgos en procedimientos de cirugía mínimamente invasiva. Particularmente, se enfoca en el proceso de toma de decisiones preoperatoria, concerniente a la planeación de las trayectorias que se deben seguir en un procedimiento quirúrgico.

Una de las características principales de las intervenciones quirúrgicas cerebrales es el alto riesgo que implica su realización ya que son técnicas invasivas en las que se introducirán herramientas especializadas dentro del cerebro. Es por esto que una de las principales preocupaciones que tienen los neurocirujanos, es poder realizar las intervenciones cerebrales con el menor daño posible. A causa de esto, se han desarrollado múltiples técnicas de cirugía mínimamente invasiva, cuyo objetivo es minimizar el daño, obteniendo la máxima eficiencia en el desarrollo de la cirugía.

Para poder analizar esta problemática, es necesario comprender que una intervención quirúrgica cerebral puede ser necesaria por múltiples causas, y cada caso será diferente acorde al historial clínico de los pacientes. Por esto, la probabilidad de éxito de una intervención incrementa cuando se realiza un proceso de planeación preoperatoria meticuloso. La planeación involucra la verificación del historial clínico del paciente, determinación del área objetivo que se quiere alcanzar, el mejor punto de abordaje y encontrar el mejor corredor quirúrgico. El corredor quirúrgico es una trayectoria recta entre el punto de abordaje y el área objetivo. Para acceder a las estructuras del cerebro se realiza una operación quirúrgica correspondiente a extraer el hueso del cráneo. Este proceso es conocido como craneotomía. Un punto importante en las neurocirugías es el reducir el daño provocado por la craneotomía, procurando que la extracción del hueso sea lo más pequeña posible, lo que se verá reflejado en una menor exposición de los tejidos cerebrales, y por ende, menores complicaciones postoperatorias.

La cirugía mínimamente invasiva tipo cerradura (Keyhole neurosurgery) es una nueva tendencia en la que algunas intervenciones pueden ser realizadas con una craneotomía mínima, y partiendo de un lugar estratégico, se puede conseguir visualizar toda un área objetivo a partir de dicha incisión [1].

La definición del punto de entrada a partir del cual se realizará la craneotomía es crucial ya que se debe obtener completa visión del objetivo, con el menor riesgo quirúrgico. Una vez que el punto de entrada está definido, la herramienta quirúrgica seguirá una trayectoria recta desde dicho punto hasta el área objetivo. La trayectoria a seguir es recta, debido a que las herramientas empleadas en el tipo de intervenciones seleccionadas en este trabajo trazan trayectorias de este tipo debido a su simplicidad y conveniencia clínica [5].

Se han realizado múltiples trabajos enfocados en la planeación de la trayectoria quirúrgica a seguir, empleando diferentes metodologías como el registro de imágenes de atlas del cerebro, la definición de estrategias de medición de riesgo, las estrategias de búsqueda de trayectorias y la segmentación de imágenes. El presente trabajo analizará estas propuestas y abordará mecanismos de mejora de dichas propuestas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La neurocirugía intracraneal ha avanzado notablemente y en la actualidad existe un gran número de intervenciones quirúrgicas que pueden llevarse a cabo con el objetivo de atacar distintas enfermedades o problemas existentes en diversos casos clínicos. Entre los distintos procedimientos quirúrgicos intracraneales podemos mencionar la resección de tumores, reparación de aneurismas cerebrales, hemorragias cerebrales, abscesos cerebrales, tratamiento de hidrocefalia y el tratamiento de la neurocisticercosis. Cada tipo de intervención tiene sus consideraciones específicas para el neurocirujano, y adicionalmente, estas pueden variar acorde a cada caso clínico en particular. Estas consideraciones conllevan a una gran cantidad de posibilidades de trayectorias a seguir durante el proceso quirúrgico. La definición de esta área de entrada, conocida como el abordaje quirúrgico, es un punto crucial, ya que una mala decisión sobre este punto puede ocasionar problemas intra y postoperatorios como hemorragias cerebrales, daño en funciones cerebrales e incluso la muerte. Es

por esto que el desarrollo de herramientas de asistencia en la toma de decisiones en cuanto a encontrar el mejor corredor quirúrgico es un tópico de amplio interés para los neurocirujanos.

Los procedimientos quirúrgicos en neurología han tenido un constante crecimiento en cuanto al desarrollo tecnológico se refiere. El diseño y fabricación de equipamiento más eficiente, moderno y versátil permite el uso de técnicas más precisas y adecuadas para ocasionar un menor daño en los procedimientos quirúrgicos. La neuroimagenología ha significado un gran aporte a los procedimientos de cirugía mínimamente invasiva, por lo cual, el empleo de la misma en el desarrollo de técnicas operatorias es uno de los principales puntos de interés en la actualidad. Existen múltiples técnicas de adquisición de este tipo de imágenes, entre estas se pueden remarcar la Tomografía axial computarizada (CT), la Tomografía por emisión de positrones (PET) y las Imágenes por resonancia magnética (MRI) [6]. Basándose en dichas imágenes se pueden llevar a cabo procedimientos quirúrgicos con distintos tipos de abordajes, como lo es el abordaje tipo cerradura, mediante el cual, se llevaran a cabo craneotomías mínimas para el tratamiento de lesiones intracraneales.

Empleando las imágenes cerebrales, se puede identificar las estructuras anatómicas de interés respecto al tipo de intervención a realizar, y con esta información, realizar una evaluación de riesgo para cada región del cerebro, creando de esta manera, un mapa de riesgo específico para la intervención a realizar. Con este mapa, se puede realizar un diagnóstico preciso del riesgo que implica la selección de una trayectoria particular.

La adquisición del mapa de riesgo para la selección de la trayectoria, al ser una parte fundamental en el procedimiento de la cirugía mínimamente invasiva tipo cerradura, se convierte en uno de los principales problemas y retos, ya que implica diversas consideraciones para poder encontrar la ruta a seguir minimizando los riesgos en cuanto a las estructuras de interés en el tejido cerebral. Con base en esta información y la profundidad de la trayectoria se puede calcular el riesgo de una trayectoria dada, y al comparar diversas trayectorias se puede encontrar cual es la ruta con el menor riesgo.

Los mecanismos de evaluación de riesgo son un tema de especial interés debido a que es la parte fundamental en el proceso de búsqueda de trayectoria. Una incorrecta evaluación de riesgo implica la selección de una trayectoria que puede no ser la mas segura o incluso ser riesgosa para el paciente. Estos mecanismos varían en la definición de las estructuras anatómicas a considerar, así como el

procesamiento de esas estructuras. En algunos trabajos simplemente se evita el tocar dichas estructuras, mientras en otros se busca alejarse lo mas posible empleando operaciones como suma ponderada o cálculo de valores máximos. El analizar cual es la mejor metodología y mejorarla en caso de ser necesario es un tema clave para encontrar las trayectorias mas seguras.

JUSTIFICACIÓN

La necesidad de minimizar el riesgo de daño en los tejidos de importancia durante intervenciones quirúrgicas es uno de los principales puntos de interés en cualquier intervención, por lo cual, mejorar las técnicas de cirugía mínimamente invasiva es una parte fundamental en el incremento de la seguridad en los procedimientos quirúrgicos. Como se puede notar, la cirugía mínimamente invasiva tipo cerradura significa un gran avance en cuanto a los procedimientos de cirugía intracraneal, optimizando el tamaño de la trepanación con respecto a la necesidad de obtener resultados adecuados.

Uno de los principales puntos a considerar en este tipo de intervenciones, es la planeación de la trayectoria a seguir. El conocimiento de un conjunto de trayectorias seguras otorga al neurocirujano la posibilidad de elegir el punto de entrada más adecuado, así como el procedimiento a seguir.

De aquí nace la importancia de mejorar estos procesos de búsqueda de trayectorias quirúrgicas, así como analizar el funcionamiento de diversos algoritmos empleados en este punto, comparando las trayectorias obtenidas en la aplicación de dichos algoritmos e incluso cotejando dicha información con las trayectorias seleccionadas de forma tradicional por un neurocirujano, para de esta manera aplicar los algoritmos que tienen un mejor desempeño.

Un punto de alta importancia en el desarrollo de un sistema de esta índole es la consideración de los elevados tiempos de procesamiento requeridos para procesar la gran cantidad de información proveniente de las imágenes médicas. Tanto el proceso de evaluación de riesgo, como el proceso de búsqueda de trayectorias seguras implica que cada voxel de la imagen médica sea analizado con respecto a los voxeles pertenecientes a zonas de riesgo como vasos sanguíneos y ventrículos. La implementación de técnicas de multiprocesamiento para acelerar estos procesos es un punto a considerar, con el objetivo

de evitar tiempos de procesamiento elevados debido a la gran cantidad de información a procesar. Una posibilidad de realizar la implementación de estos algoritmos mediante multiprocesamiento es el empleo de unidades gráficas de procesamiento (GPU).

OBJETIVOS DE LA TESIS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología para la búsqueda de trayectorias en neurocirugía tipo cerradura intracraneal aplicable a sistemas de cirugía guiada por imágenes, empleando técnicas de inteligencia artificial, obteniendo como resultado un sistema de soporte para la toma de decisiones en procedimientos neuroquirúrgicos intracraneales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Revisar el estado del arte e identificar áreas de oportunidad de mejora, así como establecer un grupo de asesoría de neurocirujanos.
2. Implementar las técnicas de etiquetado de riesgo mediante multiprocesamiento con GPU.
3. Desarrollar algoritmos de adquisición de trayectorias con base en la información obtenida en el etiquetado de riesgo, la cual toma en consideración la cercanía con estructuras anatómicas de riesgo, y empleando técnicas computacionales de inteligencia artificial adquirir las trayectorias mas seguras, para auxiliar en el proceso de toma de decisiones en procedimientos de neurocirugía.
4. Validar los resultados con respecto a las técnicas tradicionales.

ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En el resto de la Tesis se explica el proceso realizado para poder llevar a cabo la adquisición de trayectorias candidato a partir de imágenes médicas cerebrales.

En el Capítulo 1 se analiza el estado del arte en cuanto a planeación de trayectorias quirúrgicas, realizando una recopilación de los trabajos mas importantes en cuanto al tema y analizando las diferencias entre dichos trabajos.

El Capítulo 2, se centra en introducir ciertos conceptos de importancia en cuanto a contexto de la investigación, haciendo énfasis en la cirugía mínimamente invasiva y el concepto de intervenciones tipo cerradura. También se indica la importancia del desarrollo del algoritmo de etiquetado de riesgo empleando un sistema heterogéneo, así como el uso de algoritmos genéticos en el proceso de búsqueda de las trayectorias candidato. La metodología de etiquetado de riesgo es mostrada en el Capítulo 4, en donde se explican las herramientas de desarrollo empleadas, así como las herramientas de visualización de la información. En este capítulo se indican las técnicas de segmentación empleadas para encontrar las estructuras de interés, así como la relación de estas en el proceso de generación del mapa de riesgo.

En el Capítulo 5 se indica la metodología de búsqueda de trayectorias candidato empleando algoritmos genéticos.

Finalmente, como ultimo punto, las Conclusiones son mostradas en el Capítulo 6. En este capítulo también se indican los posibles trabajos futuros que pueden realizarse a partir del presente trabajo.

Investigar es ver lo que todo el mundo ha visto, y pensar lo que nadie más ha pensado.

Albert Szent

1

Estado del Arte en la Planeación de Trayectorias Quirúrgicas

Una de las premisas de la cirugía intracraneal es llevar a cabo el procedimiento por el corredor quirúrgico que ocasione el menor daño a las estructuras cerebrales definidas como de alto riesgo. Hay que tener en cuenta que este tipo de procedimientos son invasivos y siempre existirá un daño al tejido cerebral. De ahí nace la necesidad de realizar estudios para poder efectuar intervenciones mínimamente invasivas. Es por esta razón que se ha trabajado en la generación de herramientas de ayuda al neurocirujano en el proceso de toma de decisiones en el problema de la búsqueda del mejor corredor quirúrgico. A través de dicho corredor, se insertará la herramienta específica necesaria en el tipo de intervención a realizar, el camino que sigue dicha herramienta es conocido como la trayectoria quirúrgica de la intervención, la cual debe de ser la opción más segura a realizar, es decir, la que menor daño cause a estructuras de interés. Este tipo de sistemas brindan información de riesgo basados en ciertos parámetros como la cercanía con estructuras cerebrales, sin embargo, la decisión final la definirá

el neurocirujano basado en las necesidades específicas del caso clínico.

1.1. ESTRUCTURAS CEREBRALES

El cerebro es un órgano sumamente complejo que se puede dividir en diferentes partes. De forma general se puede dividir en telencéfalo, diencefalo, cerebelo y tronco encefálico. El telencéfalo se divide en dos mitades simétricas conocidas como hemisferios, unidas por una estructura conocida como cuerpo calloso. El telencéfalo se divide en distintas estructuras como la corteza cerebral, el hipocampo, la amígdala cerebral, el cuerpo estriado, el bulbo olfatorio y los ganglios basales. El diencefalo es el vínculo entre el sistema nervioso y el sistema endocrino. El diencefalo está formado por el tálamo, el hipotálamo, el epitálamo, el subtálamo y la retina. El cerebelo es una pequeña estructura situada en la base del cráneo. En el cerebelo se coordinan ciertas funciones como el equilibrio, el movimiento, la coordinación y la adquisición del lenguaje. El tronco encefálico se encuentra en la fosa cerebral posterior, se encarga de múltiples funciones de alta importancia como la respiración, la digestión y circulación sanguínea. El tronco encefálico contiene núcleos correspondientes a nervios craneales [7].

La masa cerebral se conforma de células nerviosas, gliales y vasos sanguíneos que corren a través de pliegues o circunvoluciones. Los vasos sanguíneos modulan el flujo de sangre en respuesta a las necesidades del cerebro. Cuando una región cerebral determinada trabaja de manera intensiva, aumenta la cantidad de sangre que fluye hacia ella para proporcionarle más nutrientes. Los vasos se dilatan en los puntos en los que se requiere mayor energía. Dicho ensanchamiento persuade a la sangre a redirigirse [8].

Dentro de la masa cerebral se encuentran cavidades con líquido cefalorraquídeo conocidas como ventrículos. El líquido cefalorraquídeo es de alta importancia ya que actúa como amortiguador dentro de la bóveda craneal brindando protección del sistema nervioso central. Existe un total de cuatro ventrículos cerebrales, interconectados entre ellos por diversos canales los cuales forman el sistema ventricular: los ventrículos laterales ubicados en los hemisferios cerebrales, que es en donde se genera la mayor parte del líquido cefalorraquídeo. Los ventrículos laterales se conectan con el tercer ventrículo situado debajo del tálamo a través del orificio de Monro. El cuarto ventrículo localizado en el tronco

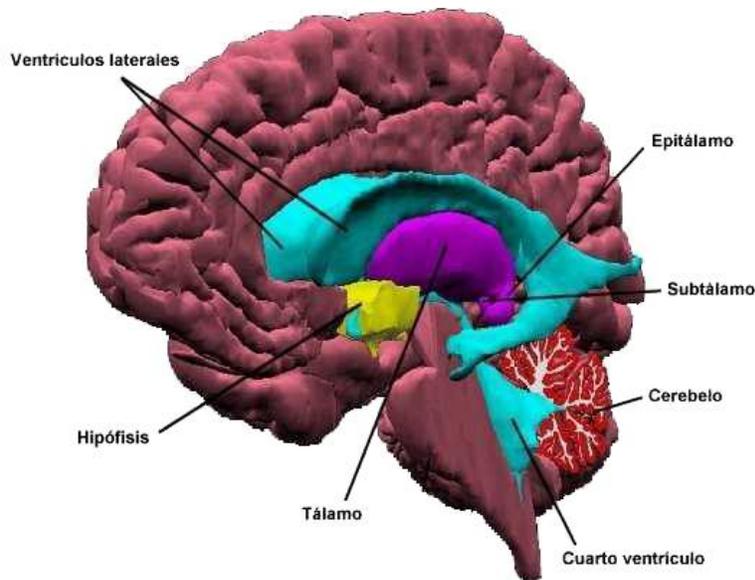


Figura 1.1: Visualización de estructuras cerebrales de importancia. Se incluyen estructuras del diencefalo (tálamo, subtálamo, epitálamo, hipófisis), cerebelo y ventrículos

cerebral se comunica con el tercer ventrículo mediante el acueducto cerebral o de Silvio [9]. En la Figura 1.1 se pueden visualizar algunas de las estructuras cerebrales que se mencionan en este apartado.

1.2. TRABAJOS RELACIONADOS

La creación de mecanismos de asistencia en el proceso de toma de decisiones fue el detonante para la creación de metodologías para la búsqueda de trayectorias quirúrgicas más seguras. De esta manera, Vaillant et al. publican un trabajo de planeación de trayectorias para cirugía guiada por imágenes [10]. En este trabajo, se propone asignar un valor de riesgo a las estructuras cerebrales más importantes. Para esto, emplea un atlas del cerebro humano [11] y define ciertas estructuras de tejido cerebral asociado con estrategias quirúrgicas particulares, asignándoles un valor de riesgo específico. Empleando técnicas de registro de imágenes, se introduce la información de riesgo generada en el atlas dentro de la imagen del paciente. Con base en esta información de riesgo, se genera una función $m_s(p)$ que entrega como resultado el costo de pasar por el punto p considerando la estructura de riesgo s . Finalmente, Tomando como referencia un punto objetivo x_t , se busca el mejor punto de entrada x_e , ubicado en el límite

externo del cerebro. Para realizar esto, se creó la función f_s que da como resultado la penalización que se tiene al pasar por una trayectoria lineal del punto x_e al punto x_t considerando la estructura de riesgo s . De esta manera se lleva a cabo la optimización al minimizar la función de costo obtenida mediante la sumatoria de todos los valores obtenidos en f_s para todas las estructuras de riesgo. Este trabajo marca la pauta a seguir al considerar valores de riesgo asignados a estructuras de tejido cerebral, sin embargo no realiza un cálculo automático empleando las imágenes del paciente, sino que utiliza un atlas, lo cual resta precisión a los valores de riesgo.

Posteriormente, Nowinsky et al., definió una metodología para cirugía funcional estereotáxica asistida por computadora [12]. En este trabajo emplea múltiples atlas cerebrales que conforman una base de datos creada con técnicas de registro de imágenes [13]. La metodología definida incluye la planeación de la trayectoria basándose en un punto objetivo definido tomando en consideración diversas situaciones quirúrgicas, como el núcleo ventral intermedio del tálamo para el caso del temblor predominante en la enfermedad de Parkinson o el globo pálido para la discinesia en la misma enfermedad. Considerando el punto objetivo y la información de la base de datos de atlas, se puede calcular la trayectoria estereotáxica basándose en la medición de la distancia existente entre la trayectoria y las estructuras de riesgo críticas definidas para el procedimiento. A pesar de manejar una base de datos más completa en cuanto a la incorporación de múltiples atlas, el problema de la precisión persiste, debido a que las estructuras no son obtenidas directamente de las imágenes del paciente sino que son incluidas de los atlas mediante técnicas de registro.

Otro método de planeación de trayectorias es propuesto por Lee et al. [14] en el que se emplean técnicas de registro de imágenes. Esta propuesta fue diseñada para procedimientos estereotáxicos empleando un sistema de guía de arco. De esta manera, empleando la información del atlas SW [15], en conjunto con las imágenes del paciente, se puede mostrar al momento de la planeación la trayectoria seleccionada de forma manual y el neurocirujano puede elegir la mejor con respecto a la cercanía de los tejidos cerebrales críticos que el considere respecto al caso clínico. En esta propuesta no se realiza selección automática de trayectoria, sino que se hace de forma manual. Adicionalmente tiene el problema de la precisión mencionado anteriormente al emplear técnicas de registro en atlas.

Fujii et al. emplearon una base de datos almacenada en Atlas, en donde obtienen los valores de importancia de tejidos cerebrales [16]. Utilizando la información de este atlas en la imagen del paciente

mediante técnicas de registro de imágenes, se tiene la información de costo respecto a la importancia de los tejidos y con la misma se puede calcular el grado invasivo de una trayectoria. Con este valor se busca la trayectoria con menor riesgo. La trayectoria encontrada es suavizada mediante la técnica de segmentación de contornos activos [17]. Un año después creó una mejora a esta metodología al incluir información extraída de la imagen del paciente, de esta manera propone un planificador automático de trayectorias para neurocirugía [18]. Para lograr esto, utiliza imágenes de angiografía de resonancia magnética (MRA), de las que obtiene la estructura de los vasos sanguíneos. Así, calcula el costo del área dominante de los vasos sanguíneos (CBVDA) considerando la distancia entre un punto específico y los vasos sanguíneos, así como el radio de los vasos sanguíneos. De esta manera se puede calcular el riesgo de cada punto particular como el riesgo máximo respecto a los vasos sanguíneos cercanos a dicho punto. Finalmente puede calcular el costo de una trayectoria recta como los costos individuales de los puntos que pasan por dicha trayectoria y suaviza esa trayectoria mediante contornos activos para visualización. Esta metodología ya incluye el cálculo de riesgos empleando estructuras propias de la imagen del paciente, pero solamente considera como estructura de riesgo a los vasos sanguíneos.

Posteriormente, Bourbakis et al. definieron una metodología de trabajo para la visualización 3D en cirugía cerebral guiada por imágenes [19]. En esta metodología emplea atlas para definir matrices de sensibilidad en tejidos $Sen(x, y, z)$, presencia de vasos sanguíneos $BL(x, y, z)$, y resistencia de tejidos $TI(x, y, z)$. Por medio de los valores de esta información, realiza el cálculo de la trayectoria recta más segura a partir de un conjunto de puntos de entrada ubicados en la superficie cerebral S_s hasta un punto $C \in A$, en donde A corresponde al área que fue mapeada anteriormente como perteneciente a un tumor cerebral. Un problema de este trabajo es que la información no es obtenida de la imagen del paciente, se obtiene a partir de atlas que son registrados de forma manual, lo que compromete la precisión considerablemente.

Otra propuesta para realizar la planeación de trayectorias en procedimientos de estimulación cerebral profunda es realizada por Brunenberg et al. [20]. En este trabajo realiza la búsqueda automática de la trayectoria más segura, de tal manera que se aleje de vasos sanguíneos, ventrículos y surcos cerebrales. Para poder lograr esto, realiza el cálculo de la distancia euclidiana entre la trayectoria y estas estructuras de riesgo. Para calcular todas las posibles trayectorias se trazan líneas rectas desde las circunvoluciones del lóbulo frontal hasta el punto objetivo correspondiente al punto de implantación del electrodo. Para cada punto de esta trayectoria se calcula la distancia a las estructuras

de riesgo mencionadas empleando interpolación trilineal, el mínimo valor obtenido para los puntos de la trayectoria es almacenado como el valor de riesgo de la trayectoria. Finalmente se selecciona la trayectoria con el menor riesgo. Éste método realiza la adquisición de las estructuras de riesgo mediante técnicas de registro de imágenes aplicadas en atlas. Esta propuesta elimina el cálculo exhaustivo en la búsqueda de trayectorias al emplear un umbral de distancia, de tal manera que solo se realiza la búsqueda de las trayectorias que se encuentren dentro de dicho umbral, sin embargo el cálculo de la distancia para todas las posibles trayectorias si es exhaustivo, y pueden existir estructuras de riesgo importantes fuera del umbral. Este método adquiere las estructuras de riesgo utilizando técnicas de registro en atlas, lo cual conlleva los problemas de precisión citados anteriormente.

Un método para identificación de trayectorias para procedimientos de estimulación cerebral profunda fue introducido por Guo et al. [21]. El método se enfoca en la construcción de un mapa probabilístico de datos que es incluido en la imagen del paciente mediante técnicas de registro de imágenes. El mapa probabilístico fue creado con base en los datos funcionales de la supresión de los síntomas de la enfermedad del Parkinson y los datos relacionados con los efectos secundarios. Con estos mapas y las imágenes del paciente se realiza una predicción lineal espacial óptima y maximizando el uso de estos valores se adquiere la predicción de trayectoria más segura. Si bien este método realiza cálculo automático en la búsqueda por la trayectoria más segura, lo realiza de forma exhaustiva, lo cual implica tiempos de procesamiento altos. Adicional, al emplear técnicas de registro en atlas, implica problemas de precisión.

Un método de implementación de un sistema inteligente para planeación de trayectorias quirúrgicas es descrito por Tirelli et al. [22]. En este método se emplea información de riesgo derivada de diversos atlas (anatómicos, vasculares, funcionales y proposicionales) para asignar un valor de riesgo para cada trayectoria de inserción sobre la base de una suma ponderada de varios factores. Para definir las políticas de riesgo emplea estructuras en lenguaje natural definidas por el neurocirujano para limitar el paso de una trayectoria por estructuras específicas. De esta manera, el método implementa una forma de definición de restricciones que pueden ser actualizadas de la base de conocimiento acorde a la experiencia del neurocirujano. Al igual que otros trabajos, emplea registro en atlas lo que conlleva a problemas de precisión.

Posteriormente, en 2010, Shamir et al. crean un método para planeación de trayectorias seguras en

neurocirugía tipo cerradura guiada por imágenes [2, 3, 4]. En este trabajo se obtienen las estructuras de riesgo a partir de la imagen del paciente y se les asigna un valor de riesgo relacionado al caso clínico. Para cada punto en la imagen se calcula el riesgo como el valor máximo obtenido del valor de riesgo de cada estructura sobre la distancia de la estructura con respecto al punto específico. Con esta información de riesgo asignada a cada punto, se analiza cada posible trayectoria calculando su valor de riesgo como la suma de los riesgos de todos los puntos que la conforman. Así, se realiza la búsqueda de la trayectoria con el menor riesgo etiquetado. Esta propuesta marca un avance bastante significativo, sin embargo, al calcular el valor de riesgo de cada punto empleando solo un valor máximo, no considera la posibilidad de que un punto puede estar rodeado por múltiples estructuras de riesgo.

Navkar et al. describe un método de visualización y planeación de intervenciones neuroquirúrgicas [5]. En esta propuesta, se define un valor mínimo permisible de distancia entre cualquier punto en la trayectoria y las estructuras de riesgo. En este trabajo se definen los vasos sanguíneos como estructura de riesgo. Esta propuesta también limita la distancia de la trayectoria al colocar un valor máximo permitido. Para cada uno de estos valores permisibles genera un mapa de acceso, y al combinarlos obtiene el mapa de riesgo completo que nos indicará las zonas más seguras para que el neurocirujano pueda decidir la mejor opción sobre estas. Este método no realiza un cálculo complejo del riesgo sino que todos los puntos en una malla son asignados con el mismo valor de riesgo y la búsqueda se limita a solamente evitar las mallas críticas.

Essert et al. publican su trabajo referente al cálculo automático de trayectorias para procedimientos de estimulación cerebral profunda [23]. Este método define los ventrículos y surcos como estructuras de riesgo y las obtiene de la imagen por medio de segmentación basada en cubos de marcha que es un algoritmo de reconstrucción 3D en el que se extraen las superficies en forma de mallas [24]. De esta forma se tiene la imagen de las estructuras a considerar en forma de mallas de puntos, mediante los cuales se puede realizar la búsqueda de la trayectoria más segura. Para poder realizar la búsqueda de los valores de riesgo define un conjunto de reglas que indican las posibles condiciones de riesgo en procedimientos de estimulación cerebral profunda. Estas reglas son clasificadas como suaves y estrictas acorde al grado de importancia en relación al procedimiento quirúrgico. Empleando estas reglas y las mallas segmentadas se obtiene la trayectoria más segura. Este trabajo define reglas claras en cuanto a restricciones quirúrgicas, sin embargo el uso de mallas de puntos resta precisión al cálculo de riesgo debido a que todos los puntos en una malla poseen las mismas consideraciones de riesgo.

Para poder realizar el proceso de planeación de trayectorias se debe procesar una gran cantidad de información, lo cual causa tiempos de procesamiento altos. Debido a esto se ve la necesidad de mejorar estos tiempos, Rincon-Nigro et al. proponen un método de acelerar este proceso [25]. Basándose en el trabajo de Navkar et al [5], genera las mallas correspondientes a las estructuras de riesgo y los mapas de acceso empleando procesamiento paralelo en unidades gráficas de procesamiento (GPU). Si bien se mejoran los tiempos de procesamiento, la información procesada en mallas resta precisión a este método.

De León-Cuevas et al. proponen una mejora al método descrito en [2]. En este trabajo se describe un sistema de lógica difusa para la evaluación de la trayectoria [26]. Para poder realizar la evaluación de una trayectoria se consideran los valores de riesgo de un voxel y la longitud de la trayectoria. De esta manera clasifica las trayectorias en 5 categorías desde segura hasta arriesgada. Así, se puede mostrar la superficie craneal con el correspondiente mapa calculado mediante lógica difusa. Para encontrar la mejor trayectoria se realiza una búsqueda exhaustiva mediante una función de defusificación aplicada a todas las posibles trayectorias. Este trabajo al igual que otros tiene la desventaja de realizar un cálculo exhaustivo para todas las posibles trayectorias, lo cual implica un mayor tiempo de procesamiento.

Hamze et al. publican su trabajo de planeación de trayectorias quirúrgicas para procedimientos de estimulación cerebral profunda [27]. En este trabajo se usa un modelo de mallas triangulares de los ventrículos, surcos y núcleo subtalámico segmentado por el método de cubos de marcha aplicado a imágenes MRI del paciente. Con estas estructuras de riesgo definidas, realiza el cálculo del mapa de riesgo y la búsqueda de la trayectoria segura empleando distintos métodos. Empleando el algoritmo multiobjetivo NSGA-II mejora los tiempos de procesamiento en la búsqueda de la trayectoria más segura. Si bien este método no realiza una búsqueda exhaustiva de la trayectoria más segura, el uso de mallas en el cálculo de riesgo disminuye la precisión.

En la Tabla 1.1 se muestra una comparación de los métodos mencionados anteriormente en relación a la propuesta de trabajo de esta tesis.

En todos los trabajos previos se definen distintas metodologías que involucran como constante una serie de pasos que se pueden visualizar en la Figura 1.2. En primer lugar se definen las estructuras de riesgo. En algunos de los trabajos previos estas estructuras están fijas y solo consideran los vasos

Tabla 1.1: Comparación de métodos de planeación de trayectorias quirúrgicas

Metodología	Evaluación de Riesgo	Búsqueda de trayectoria	Consideraciones	Método de Validación
Vaillant et al. [10]	Suma ponderada	Exhaustiva	Registro en atlas	Cualitativo
Nowinsky et al. [12]	No evalúa riesgo	Manual	Registro en atlas	Cualitativo
Lee et al. [14]	No evalúa riesgo	Manual	Registro en atlas	Cualitativo
Bourbakis et al. [19]	Suma ponderada	Exhaustiva	Registro en atlas	Cualitativo
Brunenberg et al. [20]	Máximo	Umbral de distancia	Registro en atlas	Cualitativo
Tirelli et al. [22]	Suma ponderada	Exhaustiva	Registro en atlas	Parcialmente cuantitativo
Guo et al. [21]	Máximo	Exhaustiva	Registro en mapa probabilístico	Cualitativo
Navkar et al. [5]	Evitar mallas críticas	Longitud de trayectoria	Análisis por mallas	Cualitativo
Essert et al. [23]	Restricciones geométricas	Solver basado en reglas	Análisis por mallas	Retrospectiva
Hamze et al. [27]	Suma ponderada	NSGA-II / Montecarlo	Análisis por mallas	Retrospectiva
Rincon-Nigro et al. [25]	Evitar mallas críticas	Longitud de trayectoria	Análisis por mallas	Cualitativo
Fujii et al. [18]	Máximo	Exhaustiva	Análisis por voxeles	Parcialmente Cuantitativo
Shamir et al. [2, 3, 4]	Máximo	Exhaustiva	Análisis por voxeles	Parcialmente cuantitativo
De León et al. [26]	Máximo	Lógica difusa	Análisis por voxeles	Cualitativo
Propuesta actual	Suma de N máximos	GA	Análisis por voxeles	Cualitativo

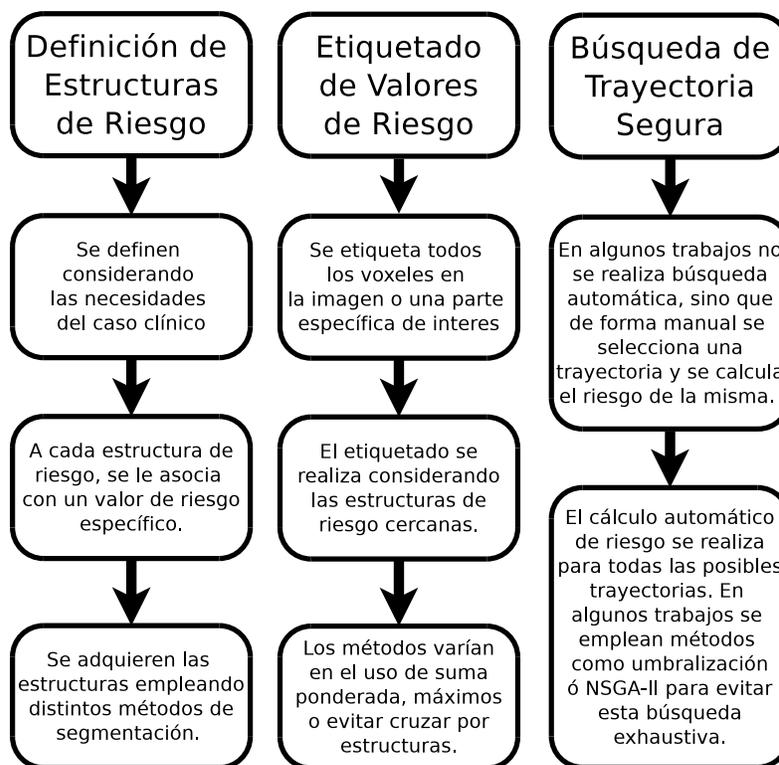


Figura 1.2: Pasos involucrados en el proceso de planeación de trayectorias seguras.

sanguíneos o los ventrículos o ambas estructuras. Esto es una desventaja dado que estas estructuras pueden cambiar dependiendo del tipo de operación quirúrgica o especificidades de los casos clínicos. En segundo lugar, se etiquetan los valores de riesgo, este conjunto de valores de riesgo forman el mapa de riesgo que se utilizará para establecer el corredor quirúrgico más seguro. Algunos trabajos previos solo establecen el riesgo asociado a las estructuras seleccionadas sin considerar las zonas que las rodean. En algunos otros casos, se definen los valores de riesgo con referencia a la estructura más cercana. En la propuesta actual se mejora el procedimiento de asignación de riesgo. Finalmente, se busca la ruta lineal más segura entre el punto de abordaje y el área destino. En la mayoría de los trabajos previos esta búsqueda se realiza en forma exhaustiva, es decir se calculan todas las posibles trayectorias. Nuestra propuesta es utilizar un método de optimización basado en algoritmos genéticos.

Tomando en consideración el proceso mostrado en la Figura 1.2, la propuesta desarrollada en el presente trabajo de investigación toma las mejores consideraciones en cada uno de los pasos de dicho proceso. Las estructuras de riesgo son obtenidas a partir de la imagen del paciente empleando técnicas de segmentación. Todo el análisis es realizado a nivel voxel para considerar una mejor precisión. El

proceso de etiquetado de riesgo forma una parte fundamental debido a que es en este punto en donde se obtiene el mapa de riesgo. En la propuesta actual se intenta mejorar este proceso de evaluación al considerar la suma de N valores máximos de riesgo para cada punto, lo cual produce valores de riesgo más precisos con respecto a las necesidades de un caso clínico. Las estructuras a considerar varían y son seleccionadas por el neurocirujano acorde a las necesidades particulares del tipo de intervención a realizar, de esta manera se pueden incluir distintas estructuras de riesgo, donde cada una puede ser catalogada con un riesgo porcentual específico. En cuanto al método empleado para realizar la búsqueda por la trayectoria más segura la propuesta de esta tesis emplea un algoritmo genético para realizar esta búsqueda sin necesidad de analizar todas las posibles trayectorias.

Según vamos adquiriendo conocimiento, las cosas no se hacen más comprensibles, sino más misteriosas.

Albert Schweitzer

2

Contexto de la Investigación

En la actualidad, los procedimientos quirúrgicos han evolucionado conforme a las necesidades clínicas y valiéndose de los avances existentes en diversas áreas tecnológicas. Una de las principales tendencias es la investigación en el área de cirugía mínimamente invasiva.

2.1. CIRUGÍA MÍNIMAMENTE INVASIVA

La neurocirugía ha avanzado notablemente en el proceso de cirugías mínimamente invasivas (CMI). Este tipo de procedimientos consiste en la exploración de las estructuras anatómicas con el objetivo de encontrar las mejores opciones para efectuar la intervención quirúrgica sin necesidad de tener un amplia visión del objetivo. En el caso de intervenciones quirúrgicas cerebrales, la trepanación es un procedimiento necesario para poder introducir herramientas en las estructuras cerebrales. La

trepanación craneal está reconocida como el primer procedimiento quirúrgico realizado por el hombre con distintos fines: mágicos, rituales y terapéuticos [28].

La exploración del interior del organismo se inicia con la presentación del cistoscopio por Maximilian Nitze en la Real e Imperial Sociedad de Medicina de Viena en 1879, instrumento mejorado en 1886 por Leiter al adaptarle una pequeña lámpara incandescente de Edison [29].

En 1901, Keilling fue el primero en practicar una laparoscopia primitiva, con la colocación de un cistoscopio, dentro del abdomen insuflado de un perro, esta intervención fue meramente exploratoria y fue denominado celioscopia. Desde este punto, esta técnica se empleó en numerosas ocasiones, mostrando la necesidad de insuflar aire en la cavidad a explorar, con el objetivo de proteger a los órganos de posibles lesiones [30].

En 1950, Hopkins describió la lente cilíndrica, que es un método para transmitir la luz por un cilindro de cuarzo sólido sin emisión de calor, y con poca pérdida de luz. Posteriormente, usando la fibra óptica, se consiguió un endoscopio semiflexible, el cual fue patentado por la Universidad de Michigan en 1956, en este se usaron unas nuevas fibras forradas con un material de bajo índice de refracción, ya que antes se impregnaban con aceites o ceras [31]. La inclusión de la fibra óptica permitió que se desarrollaran los endoscopios flexibles y que tuvieran gran aplicación a partir de 1970. Fue en el año de 1986 cuando J.E.A. Wickham sugiere el término de Cirugía mínimamente invasiva, por sus siglas CMI [32]. Wickham desde 1979 realiza exploraciones a través de la piel hasta la pelvis renal mediante un cistoscopio que modifica para convertirlo en un nefroscopio. El término CMI fue aceptado internacionalmente y ampliado para definir la CMI como el «conjunto de técnicas que, sirviéndose de un instrumental muy específico, evitan casi totalmente las lesiones inherentes a la vía de acceso quirúrgico, reducen la morbilidad operatoria y el periodo de convalecencia, al tiempo que consiguen unos resultados superponibles o incluso mejores a los que se obtienen con la cirugía abierta convencional» [33]

Desde entonces, la investigación en el desarrollo y la mejora de técnicas empleadas en cirugía mínimamente invasiva se ha incrementado notablemente. Uno de los puntos de interés en este tipo de intervenciones es la localización del área de entrada (conocida como abordaje) ideal para la minimización del riesgo. La cirugía mínimamente invasiva cerebral puede llevarse a cabo empleando diferentes tipos de abordajes:

- Abordaje tipo cerradura. Emplean la neuronavegación y su principal filosofía es realizar una incisión mínima y ocasionar una mínima retracción cerebral.
- Abordajes endoscópicos a la base craneal. Evita tener que realizar craneotomías al realizar la intervención a través de la nariz, eliminando de esta manera la manipulación del cerebro y las complicaciones asociadas.
- Ventriculostomía endoscópica. Consiste en hacer una abertura en el suelo del tercer ventrículo que permita el flujo libre del líquido cefalorraquídeo para ser absorbido por los plexos coroideos.

2.1.1. CIRUGÍA MÍNIMAMENTE INVASIVA TIPO CERRADURA

Este tipo de intervenciones son de especial interés ya que se minimiza el área de entrada, que en el caso de intervenciones cerebrales implica una menor trepanación, lo que significa una menor exposición del tejido cerebral y por consecuencia, se disminuye el riesgo notablemente.

En 1971, Donald H. Wilson describe sus esfuerzos para operar varias lesiones intracraneales mediante un abordaje pequeño. Fue el primero de los neurocirujanos en usar el término cirugía mínimamente invasiva tipo cerradura (keyhole surgery) [1].

Posteriormente, Takanori Fukushima publica su trabajo referente al abordaje interhemisférico tipo cerradura a los aneurismas de comunicante anterior. En 1993 Perneczky describe el empleo del endoscopio como instrumento de asistencia del microscopio en las craneotomías tipo cerradura. De esta manera, Perneczky indicó el objetivo de la neurocirugía mínimamente invasiva como operar con el mínimo trauma alcanzando la máxima eficiencia quirúrgica, es decir, que no solamente se debe preocupar por minimizar el tamaño de la craneotomía, sino que esta debe ser la suficiente para alcanzar la eficiencia en el procedimiento quirúrgico de interés, de tal manera que el hecho de que el tejido se exponga lo menos posible eliminando complicaciones quirúrgicas no es el objetivo de estas intervenciones, sino que más bien es el resultado de la misma filosofía. El peor error sería realizar una craneotomía tan pequeña que se pierda la esencia de la intervención quirúrgica a realizar [1].

La Neurocirugía mínimamente invasiva del tipo cerradura (Keyhole Neurosurgery) se basa en dos

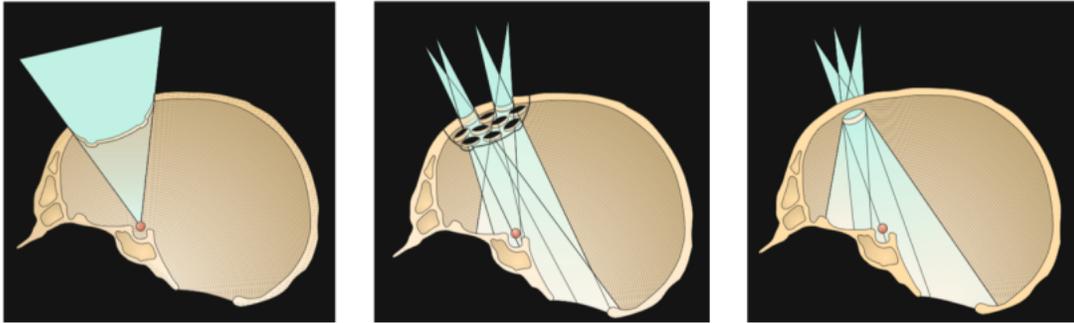


Figura 2.1: Corredor quirúrgico mediante cirugía tipo cerradura (Figura obtenida de [1]). a) Craneotomía completa para llegar al objetivo b) Una combinación de varias trepanaciones para ampliar la dimensión del corredor quirúrgico. c) Un solo abordaje tipo cerradura mediante el cual se tiene plena visualización del área objetivo.

principios fundamentales [34]:

1. El campo óptico intracraneano se agranda a medida que se aumenta la distancia de la cerradura (keyhole)
2. Las estructuras anatómicas profundas, incluso contralaterales, pueden ser alcanzadas o visualizadas a través de un punto de acceso tipo cerradura bien ubicado. Por lo tanto, si bien las lesiones superficiales requieren de craneotomías al menos de su tamaño, las lesiones profundas pueden accederse por craneotomías pequeñas tipo cerradura dada la inversión de la pirámide de exposición quirúrgica

Estos principios pueden visualizarse claramente en la Figura 2.1. La correcta implementación del abordaje tipo cerradura depende completamente de una ubicación adecuada de la craneotomía, de tal manera que se obtenga una plena visión del área objetivo y que el corredor sea el más adecuado respecto al daño generado en los tejidos cerebrales. En lugar de realizar una craneotomía extensa en donde el tejido cerebral queda expuesto (a) o múltiples craneotomías para acceder a distintos puntos (b) con una sola craneotomía colocada en el punto adecuado se puede visualizar las estructuras objetivo completamente (c).

Es importante tener en cuenta que con la expresión keyhole no solamente se describe la extensión de la craneotomía a realizar, sino que se debe considerar la limitación en cuanto a la exploración a realizar en la intervención, así como la mínima retracción cerebral. De esta manera, la minimización

de la craneotomía no es el objetivo, sino más bien el resultado de aplicar la filosofía keyhole en una intervención, al aplicar el concepto de que la craneotomía debe ser tan limitada como sea posible para minimizar los posibles traumas cerebrales, pero tan extensa como sea necesaria para alcanzar los objetivos quirúrgicos deseados.

Tomando como base el concepto de la cirugía mínimamente invasiva tipo cerradura, mediante las imágenes preoperatorias obtenidas mediante CT/MRI se puede realizar una detección precisa de estructuras anatómicas de riesgo como lo son las lesiones o los tumores cerebrales. Con base en esta información preoperatoria, se puede realizar una intervención quirúrgica entre las cuales podemos mencionar biopsias, tratamientos de hidrocefalia, estimulación cerebral profunda, inserción de catéter Ommaya, entre otros. En dichos procedimientos quirúrgicos, por la naturaleza del lugar donde se está realizando la intervención, existe gran riesgo en cuanto a una colocación incorrecta de la herramienta quirúrgica, o bien, el seguimiento de una trayectoria que produzca daños en estructuras cerebrales de importancia. De esta manera, la planificación de una trayectoria de inserción segura reduce el riesgo de colocación incorrecta y sus resultados no deseados, por lo cual, una gran área de interés en los abordajes mínimamente invasivos tipo cerradura es la planeación de dicha trayectoria.

Es importante mencionar las principales consideraciones a tomar en cuenta en este tipo de intervenciones [1]:

- La planeación adecuada de la incisión de entrada, lo cual es un punto muy importante en el proceso de la intervención, ya que el corredor quirúrgico definido, no podrá ser cambiado a lo largo de la intervención, de tal manera que el proceso de la planeación de la trayectoria se convierte en un punto clave para que dicho corredor quirúrgico sea el adecuado en una intervención quirúrgica.
- El tamaño de la incisión a realizar, el cual no debe ser tan limitado como para permitir realizar el procedimiento quirúrgico de forma adecuada.
- La incisión debe ser lo suficientemente amplia para considerar el trabajo necesario con la herramienta quirúrgica a emplear, no solamente debe ser lo suficientemente amplia para que el instrumento pueda entrar, sino que también se debe considerar el movimiento necesario durante el proceso intraoperativo.

- Se debe considerar el limitado control visual, de esta manera, la pérdida de una iluminación adecuada para el neurocirujano es uno de los problemas principales que ocasiona una gran dificultad en el reconocimiento de patologías y el control intraoperativo para atacar las mismas. Es en este punto en el que el empleo de las técnicas endoscópicas modernas son de gran interés en este tipo de abordajes tipo cerradura.

En todos los distintos tipos de procedimientos que se pueden realizar en neurocirugía intracraneal para poder encontrar la mejor opción en cuanto al lugar de la craneotomía, se realiza un procedimiento preoperativo en el cual se analizan las características propias del paciente y se busca el mejor corredor para que la cirugía ocasione el menor daño posible.

En el presente trabajo se plantea el desarrollo de un sistema que de soporte en la toma de decisiones al neurocirujano, tomando como punto de partida las imágenes médicas adquiridas por técnicas de imagenología y realizando diversas técnicas de procesamiento como definición y segmentación de las estructuras de riesgo, etiquetado de riesgo en la estructura cerebral y la búsqueda de la trayectoria más segura por medio de algoritmos de inteligencia artificial. De esta manera, empleando esta herramienta, el neurocirujano tendrá la posibilidad de tener un panorama más amplio al visualizar las estructuras de riesgo, un mapa de riesgo que considere dichas estructuras y un conjunto de trayectorias candidato de las cuales podrá seleccionar la que sea la mejor acorde a la conveniencia del caso quirúrgico.

Tal como se comentó anteriormente, la gran cantidad de información a procesar, implica un tiempo de procesamiento elevado, por lo cual es necesario implementar estos procesos empleando técnicas de procesamiento de alto rendimiento.

2.2. COMPUTACIÓN DE ALTO RENDIMIENTO (HPC)

El proceso de etiquetado de riesgo consiste básicamente en el análisis de todos los voxeles correspondientes a la masa cerebral, comparándolos con cada uno de los voxeles pertenecientes a estructuras de riesgo. Esta operación implica una gran cantidad de información a procesar, lo cual genera tiempos de procesamiento muy elevados. Por esta razón, es importante encontrar mecanismos

de procesamiento que puedan realizar esta operación, aminorando la cantidad de tiempo requerido.

En la actualidad existen múltiples arquitecturas homogéneas para realizar procesos de cómputo con alta demanda en tiempos de procesamiento y requerimientos de potencia. La construcción de soluciones para aplicaciones de alta demanda puede realizarse en diversas arquitecturas como procesadores de múltiples núcleos de propósito general, aceleradores de punto flotante, unidades gráficas de procesamiento (GPU), clusters de computadoras, supercomputadoras de alto rendimiento, hasta sistemas reconfigurables como los arreglos de compuertas programables (FPGA). Cada arquitectura tiene sus ventajas y desventajas relacionadas al manejo de las instrucciones, consumo energético, complejidad de diseño, entre otras. Esta diversidad de opciones vuelve complejo el análisis del rendimiento y selección de la plataforma, existiendo un gran número de métricas en las que se puede basar la decisión, como el tiempo de ejecución, precisión y escalabilidad [35].

2.2.1. ARQUITECTURAS HETEROGÉNEAS

Durante años, las arquitecturas de procesamiento han tenido una evolución bastante considerable debido a las necesidades de procesamiento de las aplicaciones actuales. De esta manera, muchos sistemas requieren arquitecturas de alto rendimiento cuyas necesidades no pueden ser solventadas por procesadores de propósito general.

Para mejorar el rendimiento en los sistemas, se debe incrementar las prestaciones del procesador incrementando la frecuencia o aumentando la cantidad de transistores en el chip. Estas soluciones realizan un incremento considerable en la densidad energética, necesidades de enfriamiento y los costos. Es por esta razón que es necesaria la aplicación de arquitecturas alternativas mediante las cuales se pueda satisfacer las necesidades de los sistemas de alto rendimiento.

Mediante una arquitectura heterogénea, se puede definir el trabajo colaborativo de herramientas de procesamiento homogéneo, logrando de esta manera un esquema de trabajo híbrido y cooperativo con una estrategia de divide y vencerás. La conjunción de estas plataformas de hardware y software en un solo entorno es conocido como un sistema heterogéneo [36]. Este tipo de sistemas da grandes ventajas en la elaboración de cómputo científico en el que un gran conjunto de operaciones debe de

ser llevada a cabo, ya que al dividir el trabajo en múltiples elementos, este puede realizarse de una forma adecuada, pero en un menor tiempo. Sin embargo, esto implica tener conocimiento de todos los elementos que conforman el sistema heterogéneo, lo cual implica mayor capacitación y equipos de trabajo más grandes.

Los sistemas heterogéneos son una implementación de sistemas de alto rendimiento con unidades computacionales con diferentes características. De esta manera, en un sistema se tienen múltiples procesadores que tienen distintas características, velocidades e incluso lenguajes, que se comunican entre sí para poder realizar las labores de procesamiento en un menor tiempo, sin sacrificar la precisión [37].

Este tipo de sistemas buscan la máxima eficiencia al tener distintas arquitecturas donde cada una es especializada en resolver una parte específica del problema. De esta manera cada sistema se encarga de una parte de la aplicación en conjunto y mediante paralelismo se comunican entre sí mediante flujos de instrucciones y de datos [38].

El paralelismo en los sistemas heterogéneos puede ser implementado de múltiples maneras. La idea principal es poder llevar a cabo un sistema de múltiples instrucciones con múltiples datos acorde a la taxonomía de Flynn [39]. Esto puede llevarse a cabo mediante unidades de procesamiento many-core como las Unidades de Procesamiento Gráfico (GPU por sus siglas en inglés: Graphics Processing Unit) o por procesadores especializados como los arreglos de compuertas programables (FPGA por sus siglas en inglés: Field Programmable Gate Array) [40].

Un ejemplo de implementación de arquitectura heterogénea es la comunicación en una aplicación entre un CPU y una GPU. Los fabricantes de GPU han creado múltiples plataformas para realizar la comunicación CPU-GPU en un entorno de desarrollo de aplicaciones de paralelismo. El fabricante de tarjetas gráficas de procesamiento NVIDIA creó la arquitectura unificada de dispositivos de cómputo (CUDA), la que es básicamente una plataforma de cómputo paralelo para la comunicación con las tarjetas gráficas de dicho fabricante.

El entorno de desarrollo CUDA puede implementarse en el lenguaje de alto nivel C. A esta extensión de la plataforma se le conoce como CUDA C. Esta arquitectura consiste en una serie de extensiones a C,

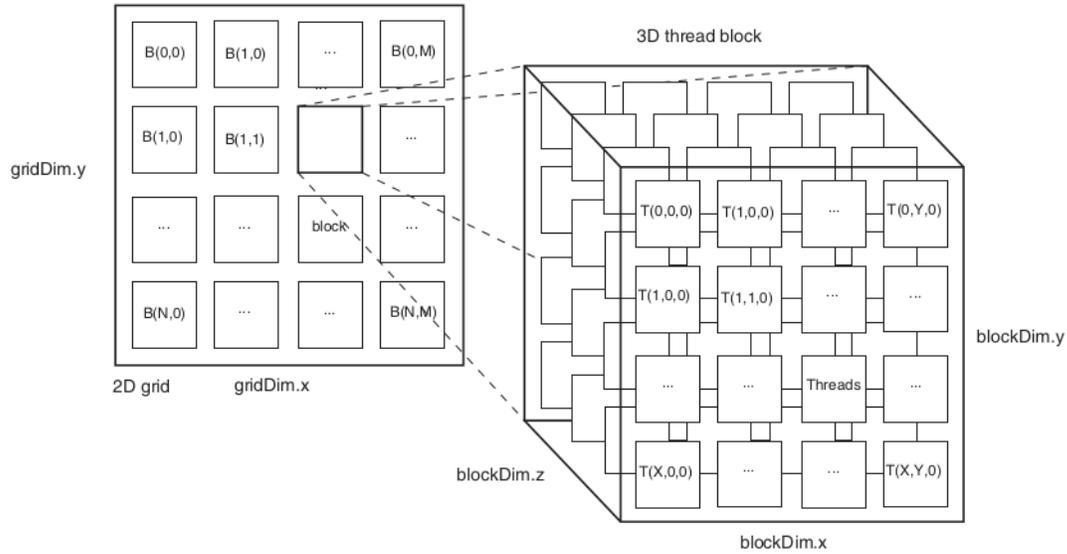


Figura 2.2: Estructura de Grids, Bloques y Threads de la Arquitectura CUDA.

entre las cuales destacan los núcleos (kernels), es decir, las funciones ejecutadas en la GPU. Para ejecutar un núcleo se emplean agrupaciones de hilos en bloques, y estos a su vez en rejillas (grids) [41]. Tanto las rejillas como los bloques pueden tener hasta 3 dimensiones, para facilitar la asignación de hilos en problemas que trabajen sobre vectores, matrices o volúmenes. La Figura 2.2 muestra un ejemplo gráfico de este modelo de programación [42]. El número máximo de bloques del grid e hilos de un bloque viene impuesto por las propias especificaciones técnicas de la GPU.

En el presente trabajo se emplea una arquitectura heterogénea CPU-GPU debido a la necesidad de procesar una gran cantidad de información, mediante esta arquitectura se pueden implementar los cálculos de forma paralela. Los cálculos pueden ser realizados en otras arquitecturas heterogéneas como lo es CPU-FPGA, sin embargo, esta aplicación está planificada para ser empleada en centros de atención clínica, en donde el consumo de energía o la necesidad de enfriamiento no es un problema, de la misma forma, no se requiere que la plataforma sea reconfigurable. Por esta razón, este trabajo fue planificado para su funcionamiento en una arquitectura CPU-GPU, y se decidió emplear el entorno de desarrollo CUDA.

2.3. CÓMPUTO EVOLUTIVO

El problema de búsqueda de trayectorias es básicamente un problema de optimización, en el cual se busca encontrar la solución con el menor riesgo a partir de un conjunto de trayectorias etiquetadas cada una con un riesgo particular.

Existe una gran cantidad de problemas de optimización en los que los tiempos de búsqueda son un elemento crítico debido a la gran cantidad de información a procesar. Para resolver este tipo de problemas se emplean las técnicas heurísticas. Estas técnicas se pueden definir formalmente como técnicas que buscan soluciones buenas (es decir, casi óptimas) a un costo computacional razonable, aunque sin garantizar que dichas soluciones sean factibles u óptimas. En algunos casos, ni siquiera puede determinar qué tan cerca del óptimo se encuentra una solución factible en particular [43]. Existen múltiples técnicas heurísticas entre las cuales podemos mencionar la búsqueda Tabú [44], el método de escalar la colina [45], y los algoritmos evolutivos [46].

Los algoritmos evolutivos se basan en características de vida y reproducción en ambientes complejos. Basándose en la evolución natural se intenta imitar las técnicas de reproducción aplicadas generación tras generación, logrando la subsistencia del más fuerte. Este tipo de algoritmos son apropiados para resolver problemas de optimización multiobjetivo, en los que se requiere encontrar un conjunto de variables de decisión que cumplan con una serie de restricciones y que optimicen un conjunto de funciones objetivo.

Entre las variantes de cómputo evolutivo que son útiles en este tipo de problemas se pueden mencionar los algoritmos genéticos, las estrategias de evolución y la programación evolutiva [47]. Alan Turing introduce el concepto de evolución en el aprendizaje de las máquinas [48] y posteriormente John Holland propone un mecanismo empleado para encontrar solución a problemas complejos denominado como algoritmos genéticos [49]. Desde entonces, los algoritmos genéticos han sido empleados como una herramienta de búsqueda heurística para la solución de problemas de optimización.

2.3.1. ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos son una herramienta obtenida a partir de operaciones de selección y mezcla que serán aplicados a una población de cromosomas que describen el problema [50].

Estos algoritmos están diseñados para imitar el principio de supervivencia del más fuerte de Darwin [51], en el cual los mejores individuos tienen una mejor probabilidad de adaptarse a un ambiente específico y sobrevivir, creando mejores descendencias con mejores genes, la que tendrá mejores probabilidades de sobrevivir en dicho ambiente [52].

La operación básica de un algoritmo genético consiste en la creación de un grupo de individuos que competirán por medio de una función de aptitud con el objetivo de verificar cuales de los individuos son más adecuados para un problema en particular. Los mejores individuos son seleccionados y reproducidos a través de técnicas de cruce y mutación, produciendo de esta manera una descendencia que será reinsertada en la población generando una nueva población más adecuada. Con la nueva población se vuelve a realizar el mismo proceso, es decir, es un proceso iterativo. A cada iteración se le conoce como generación y el número de iteraciones generalmente se define de acuerdo a un análisis de convergencia de la solución de cada generación. La Figura 2.3 muestra las operaciones realizadas en una generación de reproducción de un algoritmo genético.

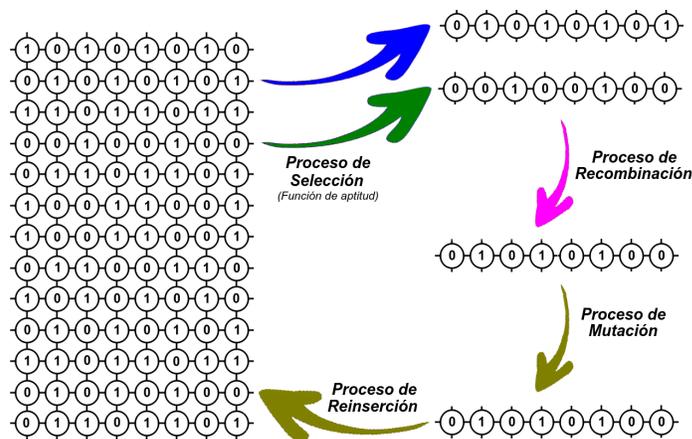


Figura 2.3: Funcionamiento básico de un algoritmo genético.

La codificación de los cromosomas es básicamente una parametrización de los valores de entrada

del problema que se desea optimizar. Cada cromosoma competirá con los demás por medio de un valor obtenido mediante el uso de una función de aptitud, de tal forma que utilizando estos valores se pueden seleccionar los mejores, los cuales se reproducirán generando una mejor población.

En resumen para implementar una solución de búsqueda mediante un algoritmo genético se deben encontrar los parámetros de optimización, codificarlos en forma de cromosoma, implementar una función de aptitud mediante la cual se pueda asignar un valor que indique las capacidades de ese cromosoma con base en el criterio de selección y finalmente correr el proceso mostrado en la Figura 2.3 por un número específico de generaciones.

La imaginación es más importante que el conocimiento. El conocimiento es limitado y la imaginación circunda el mundo.

Albert Einstein

3

Evaluación de Riesgo en Trayectorias Quirúrgicas Intracraneales

La planeación de trayectorias quirúrgicas es un proceso en el que se realizan múltiples pasos. En la Figura 3.1 podemos visualizar el flujo de trabajo general involucrado en la metodología propuesta en la presente tesis. A partir de la imagen médica, los neurocirujanos definen el área de abordaje y objetivo, así como las estructuras de interés a considerar como estructuras de riesgo. A cada estructura de riesgo seleccionada se le asigna un valor de riesgo porcentual acorde a las necesidades clínicas del caso. Con la imagen médica se procede a realizar la segmentación de las estructuras de riesgo definidas. Empleando esta información se lleva a cabo el proceso correspondiente a la metodología propuesta, en donde se genera el mapa de riesgo incluyendo información de múltiples voxeles de riesgo cercanos y se realiza una búsqueda heurística de las trayectorias candidato. Finalmente, empleando las trayectorias candidato, se lleva a cabo un proceso de análisis de datos y validación de la metodología.

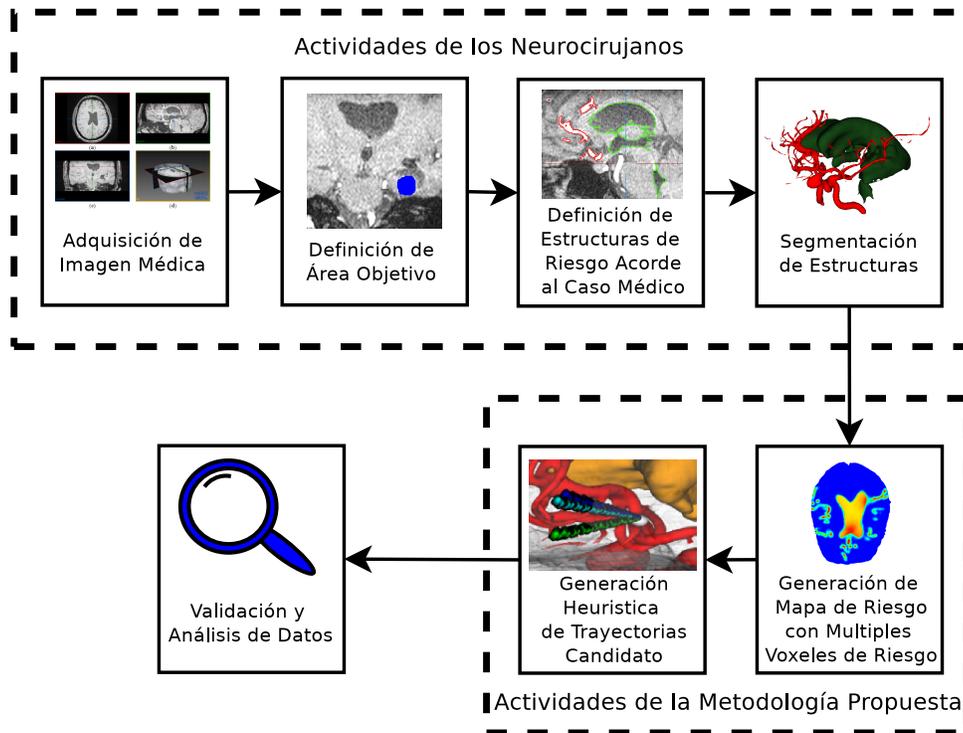


Figura 3.1: Flujo de trabajo en el proceso de planeación de trayectorias quirúrgicas.

3.1. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES MÉDICAS

La imagenología ha avanzado notablemente en la actualidad. Las imágenes médicas pueden ser adquiridas por diversas técnicas como Rayos X, tomografía computarizada (CT), tomografía por emisión de positrones (PET), tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT), ultrasonido (US) y resonancia magnética (MR) entre otras [53]. La selección de la mejor técnica es realizada por el neurocirujano y depende del tipo de intervención quirúrgica a realizar, así como las condiciones específicas del caso clínico. En este trabajo se emplearon imágenes obtenidas por medio de Angiografía por Resonancia Magnética (MRA).

Una imagen médica está conformada por una serie contigua de imágenes en dos dimensiones denominadas rebanadas ó cortes (slice). Cada corte representa un corte a través de la estructura escaneada y corresponde a un grosor específico. Cada punto en la imagen es representado por un valor escalar que corresponde a su valor de intensidad y es conocido como voxel (del inglés volumetric pixel) [54].

El Estándar y Protocolo de Imágenes Médicas DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) creado por el Colegio Americano de Radiología (ACR) se ha convertido en uno de los estándares más importantes en las aplicaciones de imágenes en medicina. El objetivo del estándar es el de habilitar la comunicación entre información de diagnóstico y terapia, almacenando imágenes y datos relacionados con las necesidades clínicas de un paciente en particular. [55]. DICOM describe la especificación de los datos primordiales de un paciente en la imagen, incluyendo varios conjuntos de imágenes relacionadas con el caso clínico, puede almacenar datos pre y postoperatorios, mediciones, cálculos generales e información descriptiva relevante para la realización de diagnósticos.

El formato genérico de un archivo DICOM consiste en dos partes: Una cabecera que contiene información de identificación como nombre del paciente, dirección y tipo de exploración. Después de la cabecera se incluye el conjunto de datos de DICOM, el cual incluye las imágenes especificadas [56].

Para la lectura de imágenes médicas en este proyecto se emplea el estándar DICOM. Existen múltiples aplicaciones en donde se puede realizar procesamiento de las imágenes almacenadas en este formato. En este trabajo se emplea el Medical Imaging Interaction Toolkit (MITK).

3.2. HERRAMIENTAS DE DESARROLLO DE APLICACIONES DE IMÁGENES MÉDICAS INTERACTIVAS (MITK)

Debido a las amplias necesidades de tener una solución rápida y eficiente para las necesidades de desarrollo de aplicaciones de análisis y visualización de imágenes médicas, en 2005 surge el MITK como un conjunto de herramientas de software que pueden ser empleadas en la producción de software y en el análisis general de aplicaciones de este tipo [57].

MITK es básicamente un marco de trabajo que incluye múltiples plataformas como las herramientas de visualización VTK y las de segmentación y registro ITK, por lo cual incluye todas las funcionalidades de dichas plataformas, integrando el poder de dichas plataformas en una sola interfase de trabajo [58]. En la Figura 3.2 se puede visualizar la pantalla principal de esta herramienta.

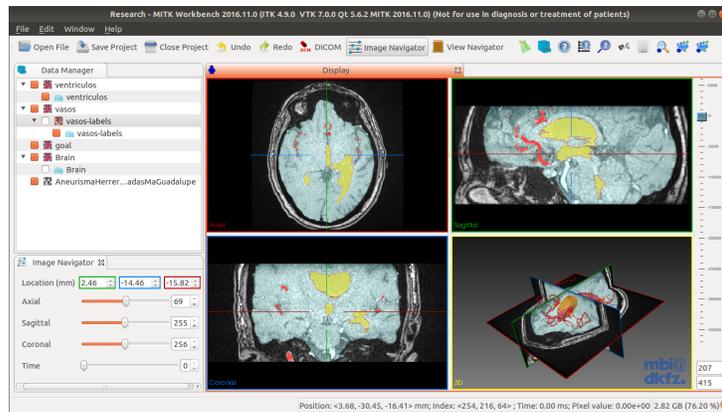


Figura 3.2: Pantalla de trabajo de las herramientas de trabajo MITK

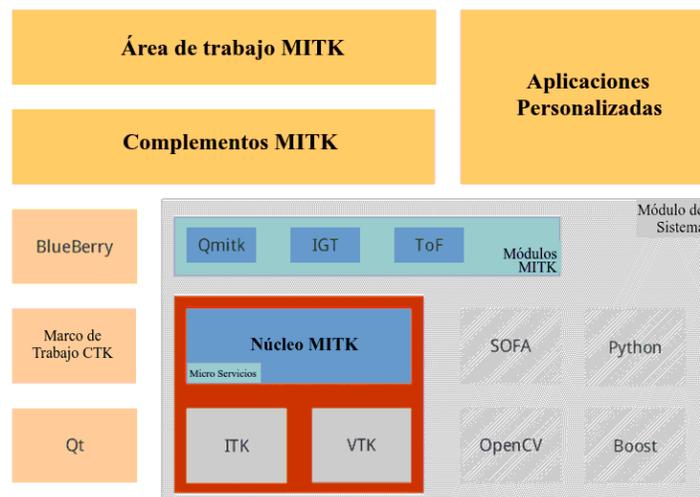


Figura 3.3: Arquitectura de MITK

Si bien MITK inicialmente fue empleado solamente como un conjunto de herramientas para visualización y trabajo con imágenes de múltiples formatos, se ha expandido con el paso del tiempo, convirtiéndose además en una arquitectura que puede ser empleada con licencia de código abierto para desarrollo de aplicaciones de imagenología médica. De esta manera, MITK está conformado por múltiples capas que pueden visualizarse en la Figura 3.3. En la parte roja se encuentra el núcleo original de MITK, en donde incluye la funcionalidad de VTK e ITK. En la arquitectura se incluyen capacidades de prototipado rápido en diversas estructuras como Python, OpenCV, SOFA y Boost. También se incluyen plugins de terceros como Blueberry, CTK y Qt. En la parte más alta se tienen los plugins para uso de MITK y el Workbench que conforma la aplicación de uso principal para visualización y trabajo con imágenes, así como el apartado de desarrollo de aplicaciones propietarias [59].

3.2.1. HERRAMIENTAS DE VISUALIZACIÓN (VTK)

El kit de herramientas de visualización VTK es un software orientado a objetos de código libre empleado para visualización de gráficas en 2 y 3 dimensiones, así como procesamiento de imágenes. Esta implementado en lenguaje C++ y soporta el desarrollo de aplicaciones en dicho lenguaje, así como TCL, Python y Java. [60].

Los datos en VTK son procesados por un sistema basado en capas conocido como pipeline. Este se construye de un segmento de procesamiento de datos el cual consiste de datos fuente y filtro de datos, y de un segmento de renderizado formado por mapeadores, actores, renderizadores y ventanas [61].

El proceso de visualización del pipeline comienza con los datos fuente, los cuales pueden sufrir una serie de transformaciones para mejora basado en una serie de filtros que pueden o no aplicarse acorde a las necesidades. A continuación, empleando mapeadores se conecta el procesamiento de datos realizado con el sistema de renderizado. Los actores se encargan de ajustar las propiedades de apariencia y manifestación física de los objetos en la escena. Así, los actores pasan a la ventana de renderizado en donde los datos se dibujan en pantalla. Dentro de una ventana se pueden colocar varios objetos renderizados e incluso agregar controles de interacción con los objetos. La Figura 3.4 muestra esta estructura de pipeline de VTK. [62]

3.2.2. KIT DE HERRAMIENTAS DE SEGMENTACIÓN Y REGISTRO DE IMÁGENES (ITK)

El kit de herramientas de segmentación y registro de imágenes ITK es un sistema con una amplia gama de recursos para realizar análisis y transformaciones en imágenes. Es un sistema de código abierto multiplataforma que provee a lo desarrolladores con las herramientas necesarias para ser empleadas en sus proyectos de software. Puede ser integrado en conjunto con VTK para realizar aplicaciones de visualización y transformación de imágenes [63].

De esta manera, empleando estas dos herramientas se puede lograr una visualización de los datos después de un proceso específico, por ejemplo, la segmentación de estructuras [64]. La Figura 3.5

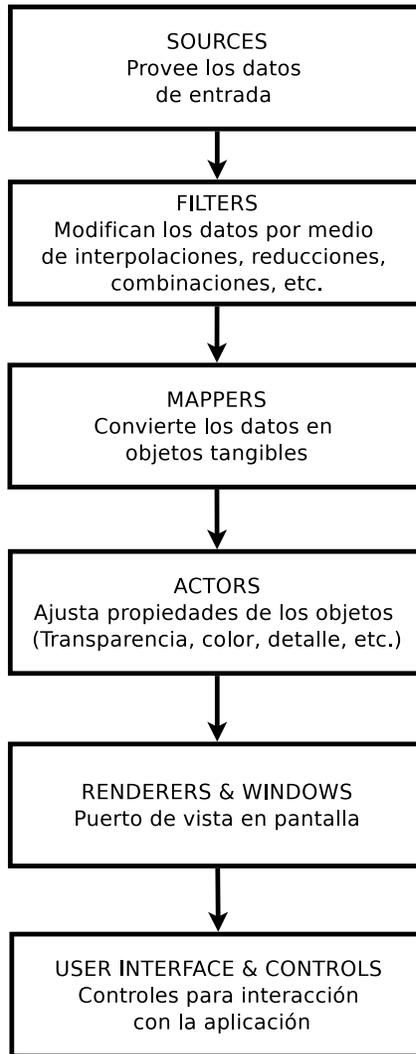


Figura 3.4: Pipeline de Visualización de VTK

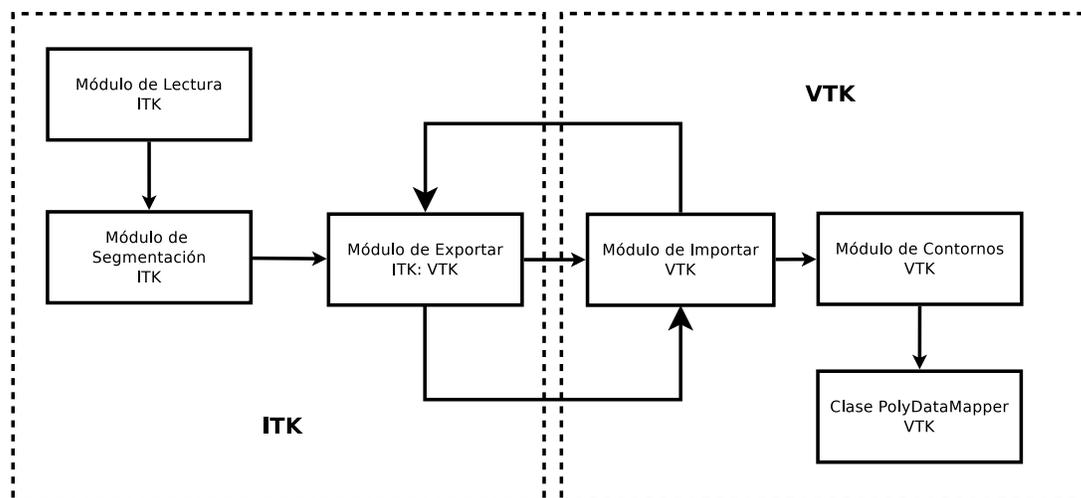


Figura 3.5: Pipeline de Conexión ITK-VTK

muestra el pipeline de conexión entre ITK y VTK, en donde visualizamos que todo comienza con la lectura de la imagen empleando un lector implementado en ITK. Estos datos son procesados por las herramientas de ITK, por ejemplo, herramientas de segmentación. Una vez que la imagen fue tratada, se exportan los datos de ITK y se importan a VTK, formando una estructura específica como contornos y finalmente un asignador de objeto del tipo mapper.

3.3. SEGMENTACIÓN DE ESTRUCTURAS

Con la imagen de entrada del paciente, se procesa la información con el objetivo de realizar la planeación preoperatoria. Para esto es importante identificar las estructuras de riesgo de interés, así como el área objetivo al cual se desea llegar en la intervención. Otro punto importante es seleccionar las posibles áreas de ingreso acorde al tipo de intervención, conocidos como abordajes quirúrgicos.

La separación de estas estructuras puede realizar mediante algoritmos de segmentación de imágenes. La segmentación puede definirse simplemente como la partición de un conjunto de datos en conjuntos de datos cuyos elementos tienen campos comunes y propiedades cohesivas [65].

Existe una gran cantidad de técnicas de segmentación disponibles en la actualidad, y la investigación

por nuevas técnicas con mejores resultados continua en la actualidad. Sin embargo, no existe un procedimiento estándar que se pueda emplear en todas las aplicaciones de procesamiento de imágenes. La selección de la técnica más adecuada depende de las características de la imagen, así como los resultados esperados, es decir, puede tener múltiples variaciones respecto a un conjunto de parámetros como lo son la calidad de la imagen, la resolución, los niveles de contraste y brillo, el área deseada y las características de forma de la misma, entre otras [66].

Una de diversas clasificaciones de las técnicas de segmentación es definida en la tipología usada por Bankman [67]. En esta divide las técnicas en 4 categorías:

1. Técnicas basadas en umbrales.
2. Técnicas basadas en detección de bordes.
3. Técnicas basadas en regiones.
4. Técnicas basadas en transformación divisoria.

Las técnicas basadas en umbrales toman en consideración un histograma bimodal en el que se pueda diferenciar el objeto empleando los valores de intensidad y tomando como referencia un valor umbral T . En la Figura 3.6 se puede visualizar una imagen con un objeto colocado sobre un fondo (a), empleando el histograma de la imagen (b), se puede identificar claramente la posición en donde es conveniente colocar el valor de umbral T para extraer la información del objeto. Se puede notar que los valores de intensidad para el fondo se colocan en el lado izquierdo, mientras los valores del objeto se ubican en el lado derecho del histograma, por lo cual el umbral T se puede colocar en cualquier punto medio de estas regiones. Con la selección de umbral se obtiene el objeto segmentado (c), eliminando toda la demás información de la imagen.

La operación básica de los métodos basados en umbral se muestra en la Ecuación 3.1 . En donde podemos observar que se calcula el valor segmentado de un punto cualquiera $S(x, y, z)$ al verificar si el valor de intensidad de dicho punto expresado por la función $f(x, y, z)$ es menor que el valor del umbral T , en cuyo caso su valor es cero, es decir, no es separado dentro de la segmentación o uno, lo

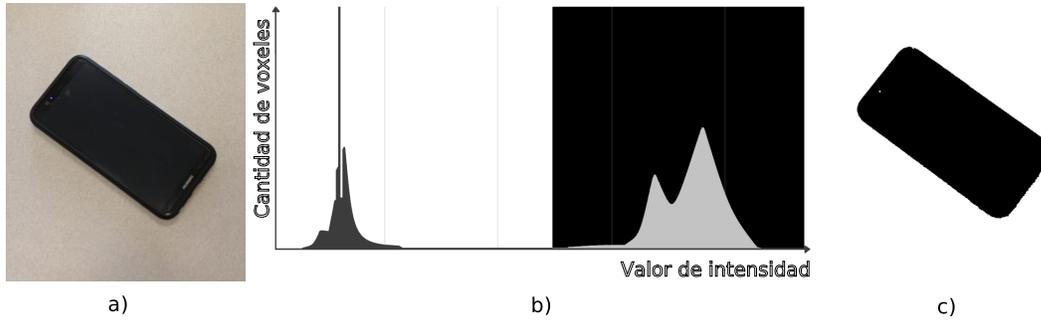


Figura 3.6: Histograma de una imagen. a) Imagen procesada. b) Histograma obtenido y selección de umbral en fondo negro. c) Objeto segmentado

cual significaría que es parte del objeto de interés [68].

$$S(x, y, z) = \begin{cases} 0 & f(x, y, z) < T \\ 1 & f(x, y, z) \geq T \end{cases} \quad (3.1)$$

Las técnicas basadas en detección de bordes toman en consideración el cambio radical de colores entre los objetos de interés y la demás información. Así, podemos considerar a los bordes de un objeto en la imagen como puntos de transición entre dos regiones con propiedades cohesivas diferentes. Un borde de una imagen está definido por el gradiente de la intensidad de los píxeles. Lo que se busca es básicamente cambios radicales en los valores de intensidad, lo cual indica la detección de un borde.

Las técnicas basadas en regiones se basan en encontrar características de homogeneidad entre grupos de puntos tomando en consideración un conjunto de puntos considerados como semillas y analizando los vecinos de dichos puntos con base en los criterios de homogeneidad definidos. La técnica de crecimiento de región (region growing) es una aproximación semiautomática basada en este concepto, y consiste en comparar valores de intensidad de los puntos semilla con un valor de umbral [69]. En la Ecuación 3.2 se puede ver una aproximación básica de este método. La función $S(p_1, p_2)$ toma un valor de 1 en caso de que la condición de homogeneidad del punto p_1 con respecto al punto p_2 se satisfaga, en caso contrario su valor es 0.

$$S(p_1, p_2) = \begin{cases} 0 & |g(p_1) - g(p_2)| < T \\ 1 & |g(p_1) - g(p_2)| \geq T \end{cases} \quad (3.2)$$

Al aplicar esta función a un punto semilla p_1 con todos sus voxeles vecinos, se encuentran los voxeles conectados y se agregan a una región R que representa el objeto a segmentar. La función $g(p_x)$ regresa el valor de intensidad del punto p_x y T es el valor de umbral seleccionado para encontrar la uniformidad de los puntos analizados. Al aplicar la función de similaridad $S(p_1, p_2)$ a un voxel semilla p_1 con respecto a un voxel vecino p_2 , si se encuentra similaridad de ambos voxeles, se agrega p_2 a la región segmentada R y se marca como un nuevo voxel semilla. Para todos los voxeles semillas se busca la similaridad con sus 8 voxeles vecinos. La Ecuación 3.3 puede ser extendida al empleo de dos niveles de umbral, uno inferior $T_{inferior}$ y uno superior $T_{superior}$.

$$S(p_1, p_2) = \begin{cases} 0 & |g(p_1) - g(p_2)| < T_{inferior} \vee |g(p_1) - g(p_2)| \geq T_{superior} \\ 1 & |g(p_1) - g(p_2)| \geq T_{inferior} \wedge |g(p_1) - g(p_2)| < T_{superior} \end{cases} \quad (3.3)$$

Las técnicas en transformación divisoria hacen uso de la morfología de las imágenes. Este proceso realiza la búsqueda de mínimos locales en los niveles de grises en las imágenes. Simula un proceso de lluvia sobre curvas de nivel topográficas. De esta manera se buscan puntos en específico, primero se ubican los puntos mínimos locales, posteriormente se buscan los puntos en los que si se coloca una gota de agua, esta cae con certeza en un único mínimo, y los puntos en que el agua caería con igual probabilidad en más de un mínimo [70].

Estas técnicas son aplicadas a las imágenes del paciente con el objetivo de separar la información de las estructuras de interés. La definición de dichas estructuras es realizada por el neurocirujano acorde al caso clínico. Las imágenes segmentadas serán empleadas posteriormente en el procedimiento de etiquetado de riesgo.

3.4. ETIQUETADO DE RIESGO

El procedimiento de etiquetado de riesgo se encarga de darle un valor de riesgo o peso a cada voxel en la imagen 3D. De esta manera, todos los valores etiquetados conformarán el mapa de riesgo que puede ser empleado para una búsqueda posterior de trayectorias.

Antes de comenzar el proceso de etiquetado, se procede a obtener las estructuras de interés. Se obtiene todo el volumen correspondiente al cerebro con el objetivo de etiquetar cada voxel en dicho volumen, así como todas las estructuras de riesgo S_k , en donde k es el número de estructuras a considerar como puntos de riesgo en el proceso intra operatorio. Estas estructuras pueden ser obtenidas mediante técnicas de segmentación tal como se menciona en la sección 3.3.

A cada estructura de Riesgo S_k se le asigna un valor de riesgo porcentual R_k equivalente acorde a las necesidades clínicas. En este trabajo se consideran 2 estructuras de riesgo consideradas como importantes:

- Los vasos sanguíneos. Esta estructura es la de mayor porcentaje de riesgo, debido a las complicaciones asociadas con hemorragias en rupturas de estas estructuras.
- Los ventrículos. Definidos con un menor porcentaje de riesgo debido a complicaciones asociadas con daños en el sistema ventricular, disminuyendo los niveles de protección creado por el flujo del líquido cerebroespinal.

Estas estructuras solamente pueden ser definidas por el neurocirujano, ya que dependen completamente del caso clínico y el tipo de intervención. Por ejemplo, en una intervención para el tratamiento de hidrocefalia los ventrículos no son una estructura de riesgo, sino que forman parte del área objetivo, ya que se debe de eliminar la presión ocasionada por un exceso de líquido cerebroespinal en los ventrículos. De igual forma, en el caso de un aneurisma cerebral, parte de los vasos sanguíneos se convierte en el área objetivo, ya que se desea realizar una intervención de clipaje en dicha área. Incluso los vasos sanguíneos se pueden subdividir en distintas estructuras donde algunas tendrán mayor riesgo que otras. Esta decisión depende plenamente del neurocirujano que conoce las necesidades específicas.

Como se pudo notar en el Capítulo 1, existen distintas propuestas para realizar el etiquetado de riesgo. El etiquetado de riesgo propuesto por Shamir et al [2] consiste en etiquetar cada voxel x acorde a los valores de Riesgo R_k y la distancia entre el centroide del voxel (\bar{x}) y la estructura de riesgo S_k . El valor máximo obtenido para todas las estructuras de riesgo será el valor etiquetado para x . La Ecuación 3.4 muestra el cálculo de riesgo realizado en este trabajo. Esta Ecuación se realiza para cada uno de los voxeles k dentro del rango $0 < k \leq K$, en donde K corresponde a la cantidad de estructuras de riesgo

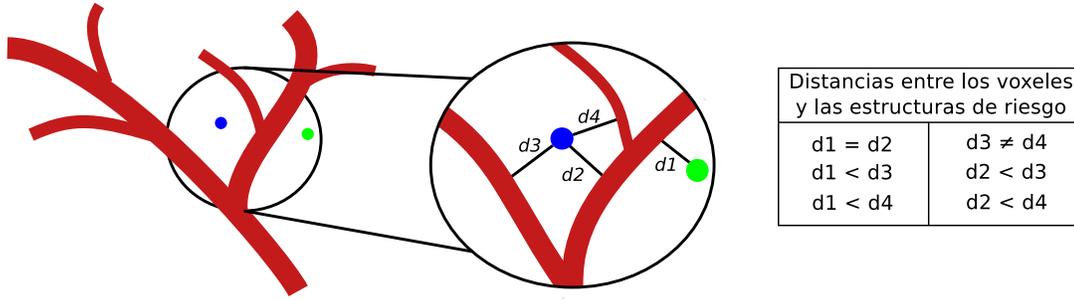


Figura 3.7: Ejemplo de Cálculo de Riesgo para 2 Voxeles Considerando 2 Estructuras de Riesgo.

en la imagen. La constante α es un valor positivo mayor que 0 con el objetivo de evitar una división entre cero.

$$risk(\bar{x}) = max \left\{ \frac{r_k}{dist(\bar{x}, s_k) + \alpha} \right\} \quad (3.4)$$

Esta aproximación de etiquetado de riesgo da un avance considerable al incluir el cálculo de la distancia y manejar riesgos variables por estructuras de riesgo. Sin embargo, el valor de riesgo etiquetado para x solamente considera un valor máximo de riesgo, lo cual involucra un solo valor de riesgo con respecto a la relación de R_k respecto a la distancia con S_k . En la realidad, un voxel puede estar rodeado por más de una estructura de riesgo, lo cual involucra un mayor riesgo a considerar. Debido a esto se puede concluir que la Ecuación 3.4 no refleja un escenario realista en consideración a que existen múltiples estructuras y una alta probabilidad de que un voxel este rodeado por múltiples estructuras. La Figura 3.7 ilustra esta situación. La menor distancia entre el voxel 1 (dibujado en color verde) y el voxel 2 (color azul), respecto a los voxeles dentro de la estructura de riesgo ($d1$ y $d2$) es la misma, por lo cual, al calcular el riesgo para los voxeles 1 y 2 empleando la Ecuación 3.4, se tiene que ambos voxeles tendrán el mismo valor de riesgo. Sin embargo, hay que considerar que el voxel 2 está rodeado por otros voxeles dentro de la misma estructura pero con distancias mayores ($d3$ y $d4$), lo cual debe de incrementar su valor de riesgo. Aun cuando las distancias $d3$ y $d4$ sean ligeramente mayores que $d1$ y $d2$, el cálculo de riesgo incluyendo $d3$ y $d4$ no se incluye en la Ecuación 3.4.

Con el objetivo de mejorar esta propuesta, es importante considerar la posibilidad de que un voxel puede estar rodeado por una o más estructuras de riesgo que impliquen múltiples voxeles de riesgo

cercanos, no solamente uno. Este trabajo propone considerar un total variable de N estructuras de riesgo cercanas por voxel. Esto se logra al realizar el cálculo correspondiente a la sumatoria de los N valores máximos.

El conjunto de todos los valores de riesgo obtenidos en el cálculo para el voxel x con respecto a todos los voxeles dentro de estructuras de riesgo segmentadas S_k es definido en la Ecuación 3.5.

$$U_x = \left\{ \frac{r_k}{\text{dist}(x, s_k) + \alpha} \mid 1 \leq k \leq M \right\} \quad (3.5)$$

El conjunto de datos U_x se define como todos los valores de riesgo para el voxel x con respecto a los voxeles S_k dentro de las estructuras de riesgo. M es el número total de voxeles dentro de estructuras de riesgo. Este cálculo se realiza mediante una división del valor de riesgo R_k y la distancia entre el voxel de riesgo S_k y el voxel x . Se incluye un valor escalar numérico positivo constante α para evitar división entre cero. En este trabajo, se manejó un valor constante de $\alpha = 1$, el cual fue asignado acorde a la recomendación de un neurocirujano.

En esta propuesta se considera incrementar el valor de riesgo para voxeles rodeados por más de una estructura. Así, se modela una función en la que se realice la sumatoria de N valores máximos existentes en el conjunto de datos U_x . Cada valor máximo representa el máximo valor de la relación entre el riesgo de una sola estructura y la distancia con respecto a dicha estructura. Al realizar la sumatoria de varios valores máximos se tendrá la consideración de que N será equivalente a la cantidad de voxeles de riesgo cercanos a considerar en el proceso de etiquetado.

Si el voxel x se encuentra lejos de cualquier voxel de riesgo, los valores de riesgo en U_x disminuirán con respecto a la distancia de las estructuras. Así, el valor de riesgo etiquetado para x será menor que el etiquetado para voxeles cercanos a estructuras de riesgo. La Figura 3.8 muestra un diagrama de bloques en el que se ilustra el cálculo de $risk_N$.

Para realizar el cálculo de riesgo, primero se obtienen todos los valores de riesgo para el voxel x y se almacenan en el conjunto U_x . Los valores en U_x son ordenados descendientemente con el objetivo de tener los valores de riesgo ordenados desde el más alto hasta el más bajo. Así, como los valores están

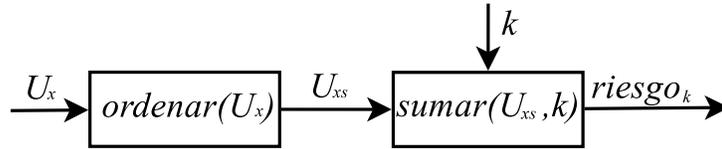


Figura 3.8: Diagrama de bloques para el cálculo de los k valores máximos.

ordenados, se realiza la suma de los primeros N valores en U_x , obteniendo de esta manera el valor de $risk_N$ que corresponde a la suma de los N valores máximos de U_x .

Este método es aplicado a todos los voxeles que son parte del cerebro (obtenidos a partir de la segmentación del cerebro). Así, al finalizar este proceso, se obtiene el mapa de riesgo como un arreglo tridimensional que contiene los valores de riesgo para todos los voxeles de la región cerebral.

El procesamiento de esta información tiene un gran costo en tiempo de procesamiento, razón por la cual es indispensable incluir mecanismos de procesamiento mediante los cuales se pueda adquirir el mapa de riesgo en un tiempo razonable.

Por esta razón, en el apartado de etiquetado de riesgo se considera la implementación del método utilizando Unidades gráficas de procesamiento, específicamente la Arquitectura Unificada de Dispositivos de Cómputo (CUDA).

Como primer paso se deben definir las posibles entradas, así como la salida esperadas del algoritmo de etiquetado. Así, se debe de leer la información obtenida del proceso de segmentación, correspondiente a cada uno de los voxeles dentro de las estructuras anatómicas que serán considerados como puntos de riesgo. Estos voxeles se almacenarán en los arreglos $xR[NR]$, $yR[NR]$ y $zR[NR]$. También se tiene como dato de entrada el arreglo $peso[NR]$, el cual contiene los valores porcentuales de riesgo correspondiente a cada voxel de riesgo. El tamaño NR de estos arreglos corresponde al total de voxeles de riesgo. También se requiere como entrada todos los voxeles que forman parte del cerebro. Estos voxeles se leerán en las variables temporales vx, vy y vz y se procesara uno a uno obteniendo el riesgo equivalente y almacenándolo en el arreglo $riesgo$. Con la definición de estas variables se puede comprender que para cada voxel (vx, vy, vz) del cerebro, se obtienen todos los valores de riesgo para cada voxel $(xR[i], yR[i], zR[i])$ y se almacenan en $riesgo[i]$, para valores de $1 \leq i \leq NR$.

Una vez que se tienen las variables de entrada y salida definidas, se debe obtener el conjunto de valores obtenidos U_X , tal como lo indica la Ecuación 3.5. El algoritmo 1 muestra la implementación de esta función.

Algorithm 1 Pseudocódigo de la función *riesgoVoxel* empleada para la adquisición de U_x

```

function __global__ riesgoVoxel(vx, vy, vz)
  indice  $\leftarrow$  blockIdx.x * blockDim.x + threadIdx.x
  paso  $\leftarrow$  blockDim.x * gridDim.x
  for i  $\leftarrow$  indice to NR, STEP paso do
    distancia  $\leftarrow$  Raiz((xR[i] - vx)2 + (yR[i] - vy)2 + (zR[i] - vx)2)
    riesgo[i]  $\leftarrow$  peso[i] / (distancia + 1)
  end for
end function

```

la función *riesgoVoxel* mostrada en el algoritmo 1 es la esencia del procesamiento del mapa de riesgo. Esta será llamada de la función de etiquetado de riesgo general, en donde se procesa el riesgo para cada voxel del cerebro. El proceso completo del mapa de riesgo, equivalente al proceso mostrado en la Figura 3.8 se visualiza en el pseudocódigo del algoritmo 2.

Algorithm 2 Pseudocódigo de la función *mapaRiesgo* mediante la cual se realiza el proceso de etiquetado de riesgo

```

Procedure mapaRiesgo()
  obtenerVoxelesRiesgo(*xR, *yR, *zR, *peso, N)
  obtenerVoxelesCerebro(*xB, *yB, *zB)
  iniciaMapa(*mapa)
  blockSize  $\leftarrow$  256
  numBlocks  $\leftarrow$  (NR + blockSize - 1) / blockSize
  iMapa  $\leftarrow$  0
  for all voxel (vx, vy, vz) dentro del cerebro do
    riesgoVoxelTotal  $\lll$  numBlocks, blockSize  $\ggg$  (vx, vy, vz)
    ordena(riesgo)
    mapa[iMapa]  $\leftarrow$  0
    for i  $\leftarrow$  0 to N do
      mapa[iMapa]  $\leftarrow$  mapa[iMapa] + riesgo[i]
    end for
    iMapa  $\leftarrow$  iMapa + 1
  end for
end function

```

Como se puede observar, además de adquirir las variables de entrada, se inicia el mapa de riesgo *mapa*, colocando todos los valores en cero. Para cada voxel dentro del cerebro se calcula el riesgo mediante el algoritmo 1, se ordenan los resultados y se agrega el valor de la suma de N máximos tal como lo indica la Figura 3.8. El mapa de riesgo final, quedara almacenado en la variable *mapa*.

*Aunque nuestra visión hacia adelante es muy corta,
podemos darnos cuenta de que hay mucho por hacer.*

Alan Mathison Turing

4

Búsqueda de Trayectorias con Menor Riesgo

Una trayectoria quirúrgica es básicamente un conjunto de voxeles contiguos que comienzan a partir de un punto de entrada y terminan en un área objetivo. Las trayectorias en cirugía intracraneal tipo cerradura son líneas rectas en las que se desea llegar a un área objetivo. Una vez que se ha llegado al área objetivo, se pueden realizar diversas acciones necesarias acorde al tipo de intervención.

Con el mapa de riesgo adquirido tal como fue mostrado en el capítulo 3, todos los voxeles en el cerebro han sido etiquetados con un valor de riesgo, por lo cual el cálculo del riesgo de una trayectoria se calcula como la suma de todos los voxeles que conforman la misma.

En la Figura 4.1 se puede observar los pasos que conforman el proceso de la búsqueda y selección de trayectorias candidato.

Se tienen un conjunto de puntos de entrada que forman el área $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$, en donde

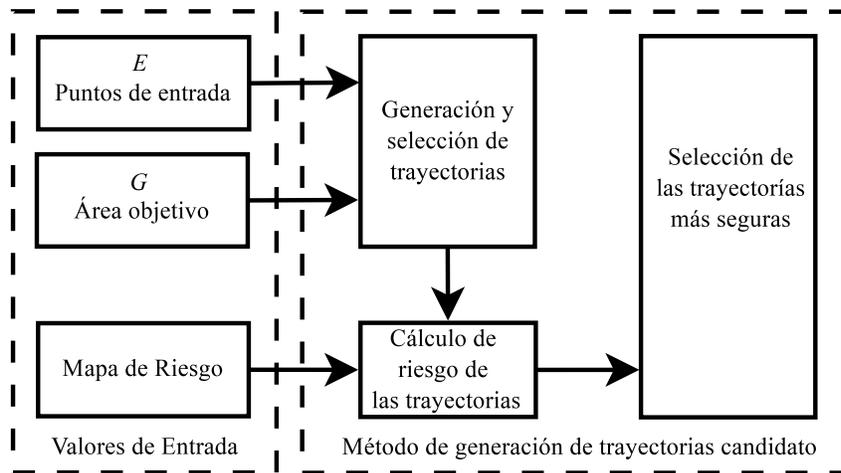


Figura 4.1: Método de generación de trayectorias candidato.

cada punto está formado por sus coordenadas (x, y, z) . Todos y cada uno de los puntos en el área E se enlazarán con cada uno de los puntos que forman el área objetivo $G = \{G_1, G_2, \dots, G_m\}$, conformando un total de $(n \cdot m)$ trayectorias. De estas trayectorias generadas, se seleccionarán las que cumplan con criterios específicos definidos como restricciones estrictas, se eliminan las trayectorias con una longitud mayor a 90 mm., las que pueden generar un daño mayor debido a la longitud de inserción [23]. También se eliminan las que crucen por la línea media cerebral para evitar daños al seno sagital [71].

Ya que se tienen las posibles trayectorias, se procede a realizar el cálculo para las mismas empleando los valores de riesgo etiquetados en el mapa de riesgo para los voxeles que conforman una trayectoria. Finalmente, a partir de estas trayectorias etiquetadas con un riesgo, se realiza una búsqueda por las trayectorias con menor valor de riesgo.

En los trabajos previos presentados en las secciones anteriores se muestran diversas aproximaciones a la búsqueda de trayectorias con el mínimo riesgo entre las que destaca:

1. Selección manual de la trayectoria por parte del cirujano y obtención del riesgo de la trayectoria seleccionada con base en el mapa de riesgo. Estos métodos no brindan un soporte completo ya que dejan al neurocirujano la selección de trayectoria en lugar de buscar la de menor riesgo de forma automática.
2. Búsqueda exhaustiva de la trayectoria, calculando todas las posibles trayectorias y obteniendo el riesgo asociado a cada una. Una vez obtenidos sus riesgos se selecciona la trayectoria con el

mínimo riesgo. Estos métodos consumen gran tiempo de procesamiento debido a la cantidad de información que se procesa.

3. Mecanismos optimizados de búsqueda de trayectoria, evitando búsquedas exhaustivas, como umbralización de distancia. Estos métodos no consideran que una estructura de alto riesgo pueda encontrarse fuera del umbral de distancia, lo cual elimina por completo dicho riesgo del cálculo final.
4. Empleo de métodos avanzados de búsqueda como el NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) o el método de Montecarlo para la búsqueda de la trayectoria más segura a partir de mallas de voxeles. Si bien estos métodos emplean estos mecanismos avanzados, el manejar la información en mallas, reduce la precisión respecto a métodos basados en cálculos voxel por voxel.

La propuesta de este trabajo es que el mapa de riesgo a nivel voxel obtenido a partir de la metodología mostrada en el Capítulo 3 se emplea en la búsqueda de la trayectoria más segura empleando algoritmos genéticos.

La búsqueda de trayectorias seguras es un problema de optimización, en el cual se realiza un análisis de la información, encontrando el valor mínimo de todas las posibilidades. Los algoritmos genéticos proveen una metodología de búsqueda adaptable en escenarios complejos, son una herramienta de búsqueda heurística compuesta de operaciones de selección, cruce y mutación, las cuales serán aplicadas a una población de cromosomas [50]. Existen múltiples técnicas de optimización disponibles que pueden ser empleadas para resolver este tipo de problemas. Además de los algoritmos genéticos (GA), podemos mencionar entre otras la optimización por enjambre de partículas (PSO)[72], la optimización por colonia de hormigas (ACO) [73] y optimización por algoritmo de abejas (BA) [74]. El problema es simple, en el que se busca encontrar la solución con menor riesgo del conjunto total de las trayectorias rectas que se forman por todos los puntos en el área de entrada E (punto de inicio de la trayectoria) hacia los puntos en el área objetivo G (punto final de la trayectoria). Por esta razón, la aplicación de un algoritmo genético simple es suficiente para poder tener resultados adecuados.

En este trabajo el algoritmo genético fue implementado usando el kit de herramientas de algoritmos genéticos desarrollado por A. J. Chipperfield y P. J. Fleming [75].

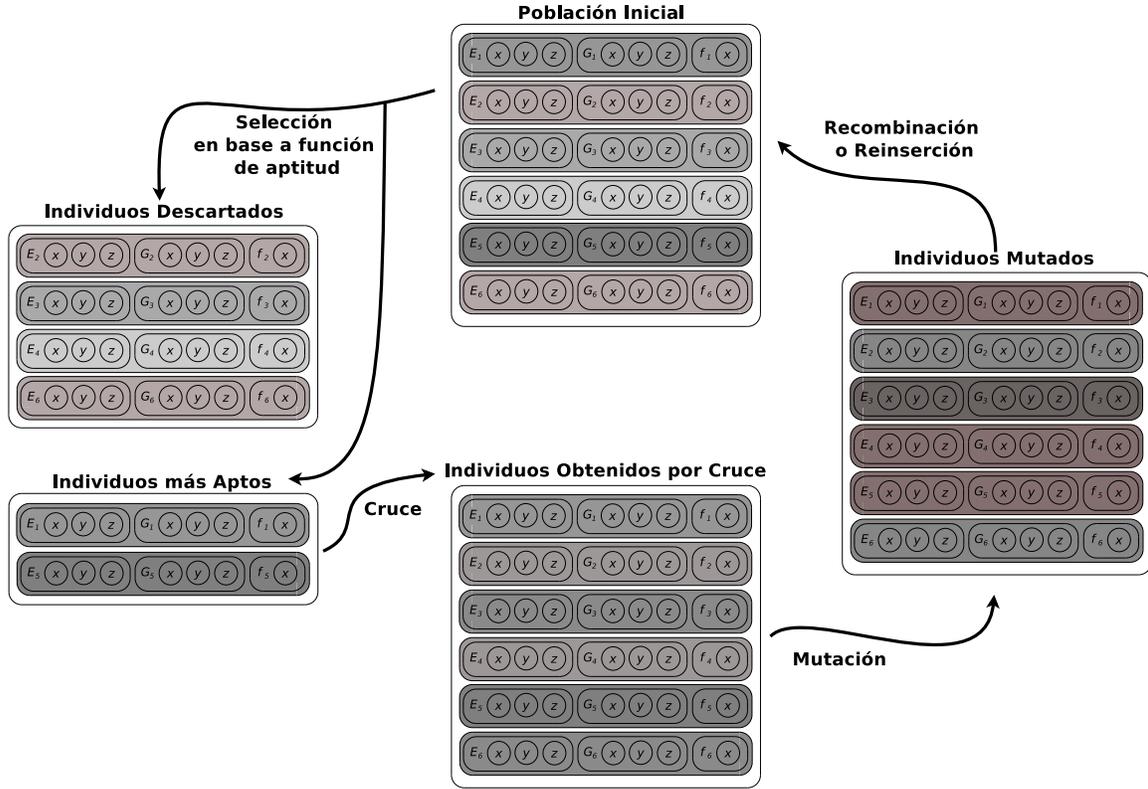


Figura 4.2: Implementación de GA en método de búsqueda de trayectorias candidato.

La implementación del algoritmo genético es mostrado en la Figura 4.2. Se comienza con la definición de la población p_x de tamaño k , tal como se muestra en la siguiente Ecuación:

$$P_x = \left[\begin{array}{cc|c} E_1 & G_1 & f_1 \\ E_2 & G_2 & f_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ E_{cm} & G_{cm} & f_{cm} \end{array} \right] \quad (4.1)$$

En donde cada fila de P_x es conocido como un cromosoma de la población. La población tiene un total de cm cromosomas. El subíndice x corresponde a la población que se tiene en una generación en particular, por ejemplo, P_0 es la población inicial. Los cromosomas son formados por un conjunto de parámetros $\{E_i, G_i\}$, inicializados aleatoriamente, en donde E_i y G_i es un conjunto de coordenadas 3D (x, y, z) . Todos los cromosomas en la población son evaluados empleando la función de aptitud f_i que nos indicara el valor de riesgo de la trayectoria recta que va desde el punto E_i hasta el punto G_i

Teniendo los valores de riesgo para cada trayectoria E_i-G_i obtenidos por la función de aptitud, se procede a realizar la selección de los individuos más aptos. Se seleccionara los que se adapten más a las necesidades, en este caso las trayectorias con el menor riesgo. Las demás trayectorias serán descartadas. A partir de las trayectorias seleccionadas, se crearán descendientes mediante operaciones de cruce de datos. Estos descendientes pueden ser mejorados empleando operaciones de mutación, en donde cada cromosoma puede sufrir cambios individuales. Finalmente, los cromosomas son reinsertados a la población. Los individuos en la nueva población tendrán mejores características al ser obtenidos a partir de los individuos más aptos.

El algoritmo 3 muestra el pseudocódigo correspondiente a la función de aptitud f_i empleado en esta aplicación específica.

Algorithm 3 Pseudocódigo de la función de aptitud $TrajectoryRisk(E_i, G_j)$ empleada para evaluación de riesgo

```

function TrajectoryRisk( $E_i, G_j$ )
   $dist \leftarrow distance(E_i.x, E_i.y, E_i.z, G_j.x, G_j.y, G_j.z)$ 
  if  $dist > 90$  then
     $f_x \leftarrow 10^7$ 
  else
     $f_x \leftarrow 0$ 
    for all voxel  $v_k$  that intersects  $E_i G_j$  trajectory do
       $f_x \leftarrow f_x + RiskMap[v_k.x, v_k.y, v_k.z]$  {Algoritmo 2}
    end for
  end if
  return  $f_x$ 
end function

```

Como se puede notar en el algoritmo 3, la función de aptitud incluye un fragmento en el que se maneja una penalización de cromosoma en el cual se le asigna un valor sumamente alto (10^7) a trayectorias con distancias mayores al umbral de 90 mm. La razón de penalizar dichos cromosomas es porque no cumplen con los parámetros establecidos respecto a la longitud de la trayectoria, ya que como se mencionó anteriormente, el no tener distancias mayores a dicho valor es una restricción estricta.

El algoritmo 4 muestra el pseudocódigo para el algoritmo genético implementado en el proceso de búsqueda de trayectorias.

Se comienza al obtener el mapa de riesgo ($RiskMap$) acorde al procedimiento mostrado en la Figura 3.8, así como también todos los puntos de entrada (E) y los puntos objetivo (G). Los puntos de entrada

y objetivo se almacenan en su correspondiente arreglo en el que se almacenan las 3 coordenadas de cada punto (x, y, z) . Posteriormente se define las dimensiones a considerar para los puntos de entrada y objetivo y se almacenan en la variable *Preci*. La información incluye el número máximo de puntos en las áreas de entrada ($maxE$), y objetivo ($maxG$), el número de inicio del arreglo para cada una de las áreas (1) y la cantidad de bits que se requieren para representar el número de puntos de entrada ($nBitsE$) y objetivo ($nBitsG$). Por ejemplo, para uno de los casos empleados en la evaluación el número máximo de puntos de entrada $maxE = 2,453,494$, por lo cual se requieren de 22 bits para representar dicho número, por lo que $nBitsE = 22$, para los puntos objetivo, se tiene que $maxG = 1882$, por lo que se requiere que $nBitsG = 11$. Esta información de precisión es enviada a todos los métodos para que considere los valores que se deben emplear como válidos en los procesos de selección, recombinación y mutación. Una vez que se definió los posibles valores de cada cromosoma, se procede a inicializar la población tal como se muestra en la Ecuación 4.1 y se evalúa la población empleando la función de aptitud mostrada en el algoritmo 3. Posteriormente, los mejores individuos son seleccionados y con ellos se crea una descendencia a partir de operaciones de cruce y mutación. Tanto el método de recombinación como el de mutación reciben la información de precisión *Preci* con el objetivo de que el resultado de estos procesos se encuentre dentro de los valores permisibles marcados por $maxE$ y $maxG$. La descendencia creada es reinsertada en la población original y el proceso se repite por varias generaciones. En este trabajo se establecieron los siguientes valores para los parámetros del algoritmo genético: una población de 800 individuos que se procesaran en un total de 1000 generaciones, la brecha de generación (generation gap) es de 20 %, el método de selección es muestreo estocástico universal y se emplea el método de cruce simple por puntos (single point crossover) para realizar el cruce de individuos. La probabilidad de cruce es del 70 %, mientras que la probabilidad de mutación es de 10 %. Para más información referente a los parámetros de calibración se puede revisar el libro de algoritmos genéticos en búsqueda, optimización y aprendizaje automático [76].

Al aplicar el algoritmo 4, se obtendrán los mejores individuos que en este caso corresponden a las trayectorias con menor riesgo. Estas trayectorias se muestran al neurocirujano para que pueda elegir entre el conjunto de soluciones la que considere más pertinente acorde a la intervención a realizar.

La implementación de este algoritmo, ayuda a encontrar el conjunto de mejores soluciones sin la necesidad de realizar una búsqueda exhaustiva, ya que la búsqueda se basa en técnicas heurísticas mediante las cuales se busca tomando en consideración las propiedades de los mejores elementos

Algorithm 4 Pseudocódigo del algoritmo genético propuesto para la generación de trayectorias candidato.

procedure SearchTrajectories()

RiskMap \leftarrow *mapaRiesgo()* {Algoritmo 2}

E \leftarrow *InputArea()* {Arreglo con las coordenadas de cada punto en el área de entrada}

G \leftarrow *TargetArea()* {Arreglo con las coordenadas de cada punto en el área objetivo}

Preci \leftarrow [*nBitsE*, *nBitsG*, 1, 1, *maxE*, *maxG*]

InitializePopulation(*p*₁, *Preci*)

EvaluatePopulation(*p*₁, *Preci*, *RiskMap*, *E*, *G*) {Algorithm 3}

for *i* = 1 to *g* **do**

*p*_s = *Select*(*p*₁, *Preci*)

Recombine(*p*_s, *Preci*, 70%)

Mutate(*p*_s, *Preci*, 10%)

EvaluatePopulation(*p*_s, *Preci*, *RiskMap*, *E*, *G*) {Algorithm 3}

Reinsert(*p*_s, *p*₁, *Preci*)

end for

end procedure

encontrados previamente. Así, los tiempos de procesamiento en cuanto a la búsqueda de la trayectoria más segura son menores, y el resultado es un conjunto de soluciones en lugar de tener una única solución, brindándole al neurocirujano un conjunto más amplio en el que pueda elegir la mejor opción.

Los parámetros de calibración del algoritmo genético pueden ser configurables con el objetivo de dejar abierta la capacidad de encontrar una mejor solución o bien, mejorar los tiempos de procesamiento encontrando mínimos locales. Si bien un mínimo local no es la solución óptima, puede ser una solución adecuada que cumpla con las necesidades del neurocirujano y esta es obtenida en un tiempo menor.

Ninguna cantidad de experimentación puede probar definitivamente que tengo razón; pero un solo experimento puede probar que estoy equivocado.

Albert Einstein

5

Pruebas Experimentales y Evaluación de Resultados

La implementación de la metodología presentada en este trabajo se realizó empleando diferentes herramientas. Para los trabajos de segmentación se empleó el MITK Workbench [65]. La implementación del algoritmo genético fue realizada mediante el toolbox, desarrollado por A.J. Chipperfield y P.J. Fleming [75]. Para la visualización de las estructuras se emplea el toolkit de visualización VTK [60] empleando el lenguaje de programación C++.

Para poder poner a prueba los resultados obtenidos con la metodología propuesta, se tomo como base una imagen médica almacenada en el estándar DICOM [56]. La imagen médica de ejemplo corresponde a una Angiografía por Resonancia Magnética (MRA) proporcionada por el Hospital Central Dr. Ignacio Morones Prieto. La resolución de esta imagen es de 512 x 514 y cuenta con 236 cortes. Cada corte corresponde a un grosor de 0.51 mm. En la Figura 5.1 se muestra esta imagen médica en vistas

axial, sagital y coronal, así como la reconstrucción 3D de dicha imagen.

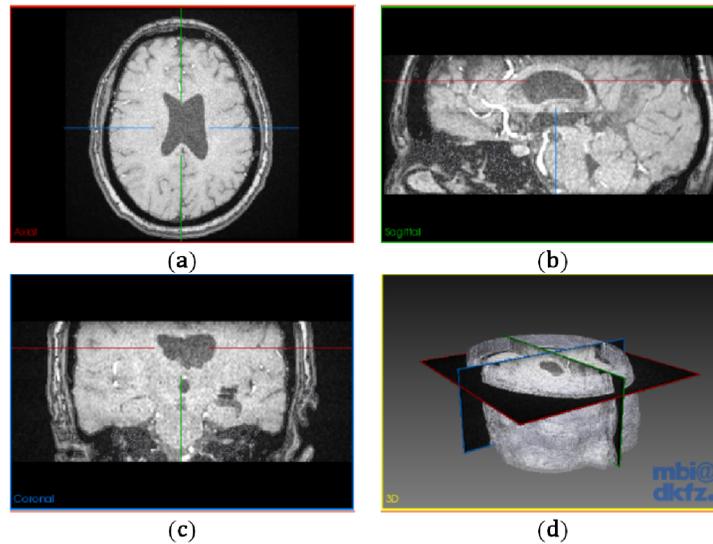


Figura 5.1: Imagen Médica del Caso Clínico empleado como experimento. (a) Vista Axial; (b) Vista Sagital; (c) Vista Coronal; (d) Reconstrucción 3D del Cráneo

Con el objetivo de realizar el proceso de etiquetado, el neurocirujano define las estructuras de riesgo a emplear para los casos de estudio. De esta manera se define realizar el proceso de segmentación de los vasos sanguíneos y los ventrículos como estructuras de riesgo. También se debe segmentar la superficie cerebral con el objetivo de tener el conjunto de voxeles que deben ser etiquetados con un valor de riesgo. También se segmenta la superficie craneal con el objetivo de definir el área de abordaje. Finalmente, de forma manual se separa la información correspondiente al área de abordaje y los objetivos.

Para comenzar, se segmenta la superficie craneal. Este proceso es realizado empleando segmentación por doble umbral. El umbral bajo es colocado con un valor de 100 mientras que el alto emplea un valor de 200. Estos valores representan el nivel de gris que es considerado como límites bajo y alto en el proceso de segmentación. El resultado de la segmentación aplicando esta técnica con los valores mencionados se muestra en la Figura 5.2.

A continuación se procede a segmentar las estructuras de riesgo. Acorde a la sugerencia de los neurocirujanos, se realizó la segmentación de vasos sanguíneos y ventrículos. Los vasos sanguíneos se segmentaron empleando la técnica de crecimiento de región. Para lograr esto, se seleccionaron como semillas un conjunto de voxeles que forman parte de los vasos sanguíneos en distintos puntos de la imagen. Con estos puntos se seleccionaron dos puntos de umbral que definirán los límites. El umbral

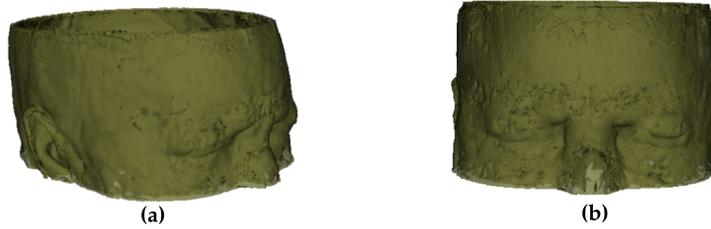


Figura 5.2: Reconstrucción 3D de la segmentación de la superficie craneal. (a) Vista Lateral; (b) Vista Frontal;

bajo se definió con un valor de 395, mientras el punto alto se definió con el valor de 1400. El resultado de esta segmentación se muestra en la Figura 5.3.

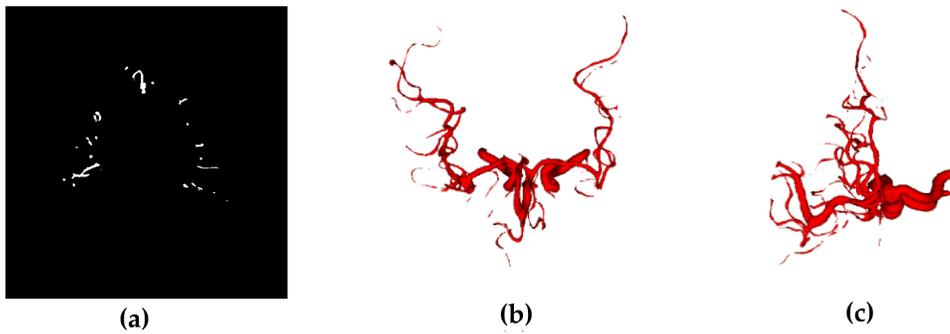


Figura 5.3: Segmentación de los vasos sanguíneos. (a) Corte axial; (b) Vista superior de la reconstrucción 3D; (c) Vista lateral de la reconstrucción 3D

En el caso de la segmentación de ventrículos, se empleó nuevamente la técnica de crecimiento de región. Para esta segmentación nuevamente se seleccionaron varios voxeles dentro de los ventrículos como semillas, y tomando el valor de umbral bajo como 200 y umbral alto con el valor de 240. El resultado de este proceso es mostrado en la Figura 5.4.

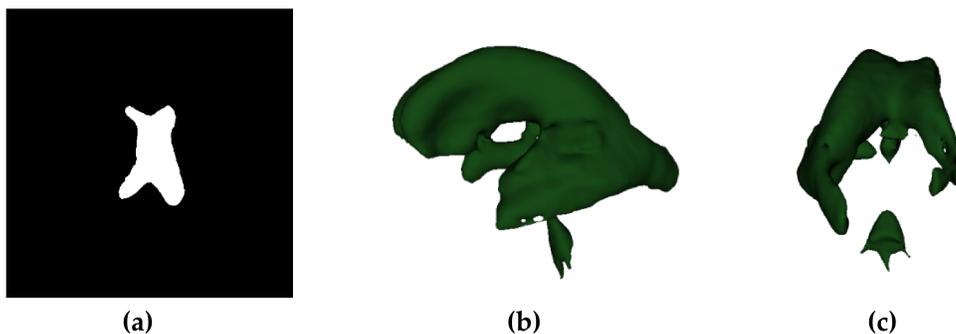


Figura 5.4: Segmentación de los ventrículos. (a) Corte axial; (b) Vista lateral de la reconstrucción 3D; (c) Vista trasera de la reconstrucción 3D

Con el objetivo de identificar todos los voxeles que deben ser etiquetados con un valor de riesgo, se

realiza la segmentación de la superficie cerebral. Nuevamente se emplea la técnica de crecimiento de región, con valor de umbral bajo de 100 y umbral alto de 500. De esta manera se obtiene la superficie que incluye todos los voxels que serán procesados en el método de etiquetado. La Figura 5.5 muestra el resultado de la aplicación de las técnicas de segmentación en las estructuras de riesgo y en la superficie cerebral.

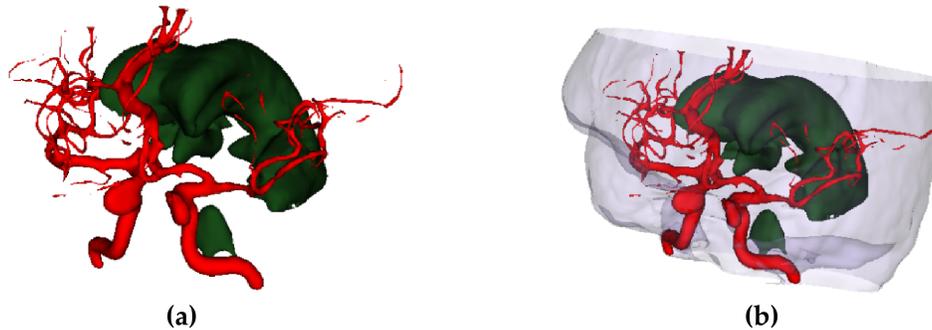


Figura 5.5: Reconstrucción 3D del resultado del proceso de segmentación. (a) Vasos sanguíneos y ventrículos; (b) Superficie cerebral con las estructuras de riesgo

A partir de la imagen original y las imágenes segmentadas, los neurocirujanos pueden elegir el área objetivo al que se desea acceder, así como el área de abordaje específica que desea emplear. De esta manera, se puede dejar abierta la búsqueda a partir de un conjunto de abordajes específicos y buscar la mejor opción en la búsqueda automática de trayectorias. La Figura 5.6 muestra las áreas seleccionadas. Con el objetivo de realizar pruebas de la metodología, se seleccionó la parte superior de la superficie craneal como área de abordaje (dibujada en color cyan). Esta área incluye todos los voxels a considerar como posibilidades de abordaje para poder llegar a las áreas objetivo (dibujadas en colores magenta para el caso de colocación de un electrodo y rojo para el acceso intraventricular). Se incluyen dos áreas objetivo de dos casos para poder tener un punto de comparación en dos distintos casos.

Con las estructuras segmentadas se procede a realizar el proceso de etiquetado de riesgo. Para esto, cada voxel en la imagen segmentada del cerebro será procesada y se le asignará su valor de riesgo correspondiente. En la imagen médica procesada en este trabajo se tiene un total de 10,595,790 voxels.

El proceso de etiquetado se realiza acorde a la metodología mostrada en el Capítulo 3. La premisa de la metodología es que el incluir N valores máximos en el proceso de cálculo de riesgo para cada voxel, genera información más precisa en los valores de riesgo para cada voxel. Para poder visualizar el comportamiento de la metodología, se realizó el proceso de etiquetado con valores de $N = 1$, $N = 5$,

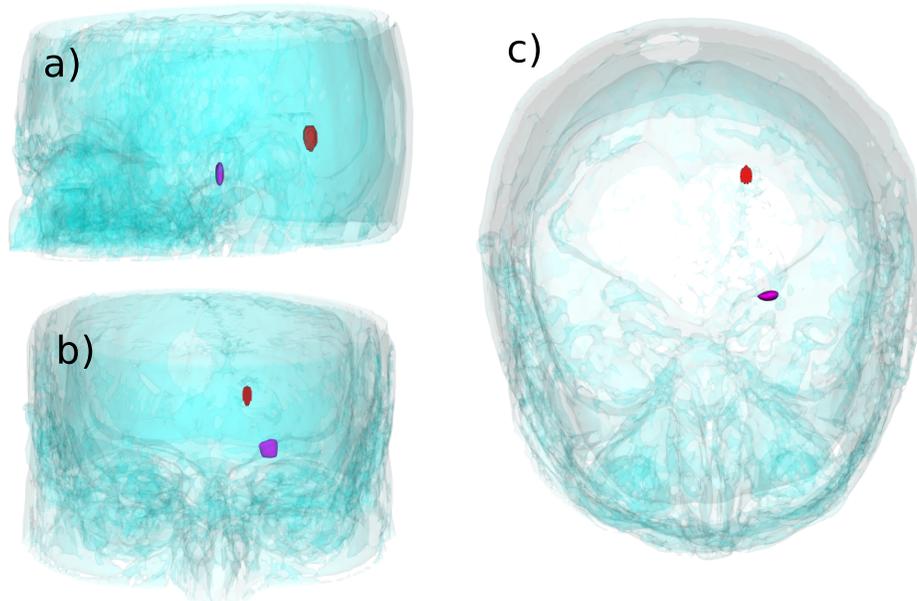


Figura 5.6: Visualización del área de abordaje (color cyan) y 2 áreas objetivos definidas para dos casos de estudio (color magenta para el caso de colocación de un electrodo y rojo para el acceso a tumor intraventricular). a) Vista Lateral izquierda, b) Vista Frontal, c) Vista Superior

$N = 10$ y $N = 20$. La Figura 5.7 muestra el resultado del mapa de riesgo obtenido para los valores mencionados de N . Para realizar el etiquetado de riesgo, el neurocirujano propuso valores de riesgo correspondientes al 70 % para los vasos sanguíneos y de un 45 % para los ventrículos. A la constante α se le asignó un valor de 1.

La columna (a) de la Figura 5.7, muestra la aplicación de la metodología con un valor de $N = 1$. Esto es equivalente al mapa de riesgo obtenido en la metodología definida en el trabajo realizado por Shamir et al [2, 3, 4]. Como se puede visualizar, tanto los ventrículos como los vasos sanguíneos tienen un valor de riesgo asignado. Sin embargo, a pesar que los vasos sanguíneos tienen un mayor riesgo que los ventrículos, el valor etiquetado en los ventrículos es mayor que el de los vasos. Esto sucede así debido a la mayor cantidad de voxels correspondientes a los ventrículos.

La columna (b) de la Figura 5.7 muestra el mapa de riesgo para $N = 5$. Se puede visualizar un etiquetado de riesgo más adecuado a los valores de riesgo seleccionados, en los que los vasos sanguíneos tienen un valor de riesgo mayor que los ventrículos. La mayor parte de los ventrículos se visualiza en color amarillo, que si bien es un valor de riesgo alto, es menor que los vasos sanguíneos que se visualizan en color rojo que corresponde al máximo valor de riesgo. Los ventrículos se convierten suavemente de

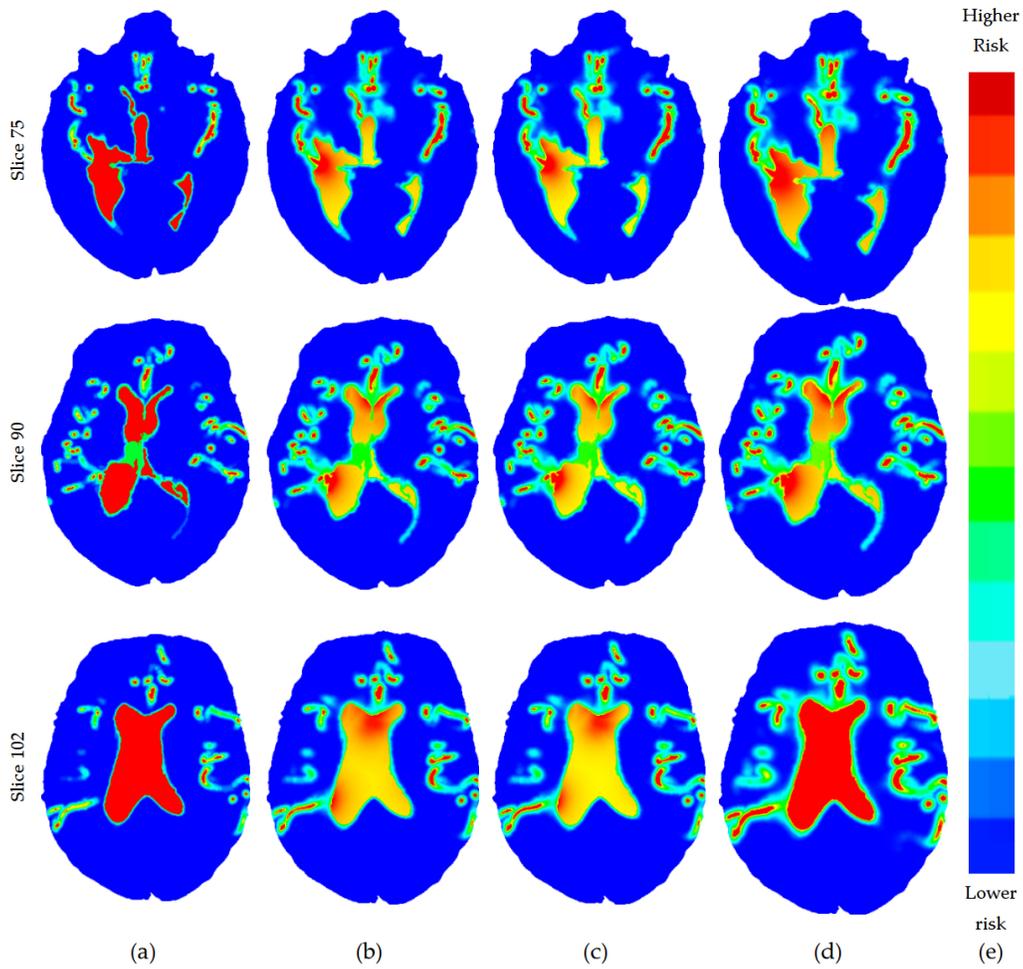


Figura 5.7: Distintos cortes axiales del mapa de riesgo obtenido para distintos valores de N . (a) $N = 1$, (b) $N = 5$, (c) $N = 10$, (d) $N = 20$

amarillo a rojo, conforme se acercan a vasos sanguíneos, situación que refleja el uso de N valores máximos. El mapa de riesgo obtenido para $N = 10$ es muy similar al de 5 valores máximos con diferencias casi imperceptibles, sin embargo el tiempo de procesamiento es casi el doble del tiempo consumido para $N = 5$. Al incrementar el valor de N a 20, el mapa de riesgo comienza a perder precisión, dando más valor a los ventrículos y perdiendo la suavidad que se obtenía en valores de N menores. Estos mapas fueron mostrados a los neurocirujanos para poder seleccionar el mejor acorde a su amplia experiencia. De forma unánime, los neurocirujanos eligieron el mapa obtenido con $N = 5$, remarcando la suavidad que se tiene al asignar los valores de riesgo conforme a la cercanía de las estructuras de riesgo.

Con el mapa de riesgo definido, se procede a realizar la búsqueda de la trayectoria. Para esto, se emplean las áreas de abordaje y objetivo definidas previamente por los neurocirujanos. Con el objetivo de validar la metodología se realizó la búsqueda de dos trayectorias. Los neurocirujanos definieron dos objetivos conforme a procedimientos quirúrgicos. El primer objetivo corresponde a la colocación de un electrodo en el hipocampo izquierdo a través de la segunda circunvolución temporal izquierda. El segundo objetivo corresponde a una trayectoria parietal transcortical posterior para acceder a un tumor en el atrio intraventricular izquierdo. En la Figura 5.8 se puede visualizar ambas áreas de acceso propuestas de forma manual por el grupo de neurocirujanos.

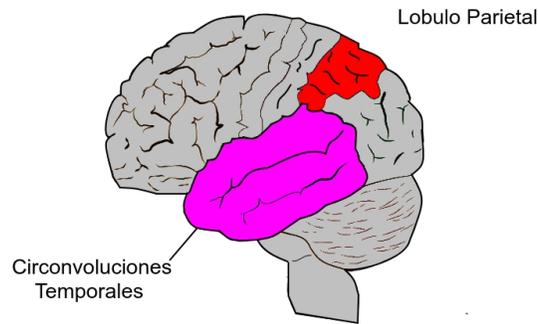


Figura 5.8: Áreas de abordaje propuestas por los neurocirujanos de forma manual.

El proceso de búsqueda de una trayectoria se lleva a cabo al trazar líneas rectas a partir de todos los voxeles (x_1, y_1, z_1) que se encuentran en el área de entrada E y que finalizan en cada uno de los voxeles (x_2, y_2, z_2) ubicados en el área objetivo G . Así, se puede trazar la trayectoria T_x , formada por un conjunto de voxeles v_i , tal como se muestra en la Ecuación 5.1

$$T_x = \bigcup_{i=1}^n v_i \quad (5.1)$$

Para poder trazar la trayectoria, se empleó el algoritmo de trazo de línea de Bresenham [77]. El riesgo de la trayectoria se calcula mediante la sumatoria de todos los valores de riesgo de los voxeles que forman parte de dicha trayectoria. La Ecuación 5.2 muestra el cálculo del valor de riesgo R_{T_x} de la

trayectoria.

$$R_{T_x} = \sum_{i=1}^n risk(v_i) \quad (5.2)$$

Con la Ecuación 5.2, se cuenta con el medio de verificar el riesgo de cada una de las posibles trayectorias. Así, se realiza el proceso de búsqueda por la trayectoria con menor riesgo empleando un algoritmo genético. Se ejecutan los algoritmos 3 y 4, y como resultado se obtienen las trayectorias más seguras formadas por un voxel de inicio $v_i \in E$ y un voxel de fin de trayectoria $v_f \in G$. Finalmente, estas trayectorias encontradas se visualizan mediante el toolkit VTK.

5.1. EXPERIMENTO DE VALIDACIÓN

La validación de una metodología es un punto muy importante a realizar para cualquier trabajo. En cuanto al trabajo relacionado mencionado en el presente documento, se han realizado validaciones cuantitativas y cualitativas [10, 14, 20, 25, 23, 26, 27], sin embargo, no se cuenta con un proceso de validación establecido. Tampoco existen medidas de desempeño que nos permitan realizar la validación de los resultados. Una forma de poder obtener un análisis de la validez de los resultados es verificar el trabajo realizado por los expertos y comparar los resultados de la metodología con la forma tradicional de hacer las cosas con un grupo de neurocirujanos. Así se puede tener un dato cuantitativo que considera la selección de las trayectorias más seguras seleccionadas por los expertos.

La Figura 5.9 muestra el flujo de trabajo implementado en el proceso de validación de la metodología propuesta. Tomando como referencia una imagen médica, un grupo de neurocirujanos define una estrategia ideal para las dos trayectorias mencionadas previamente, seleccionando las áreas de abordaje y objetivo para ambos casos, identificando la trayectoria más segura acorde a su amplia experiencia. Con las trayectorias ideales se procede al cálculo de la trayectoria automática empleando el flujo de trabajo mostrado en la Figura 3.1. De esta manera, se tienen las trayectorias automáticas generadas por la metodología propuesta, así como las trayectorias manuales seleccionadas con base en la experiencia de

los neurocirujanos. Estas trayectorias son comparadas en términos de importancia como es la longitud de la trayectoria y la distancia con las estructuras de riesgo.

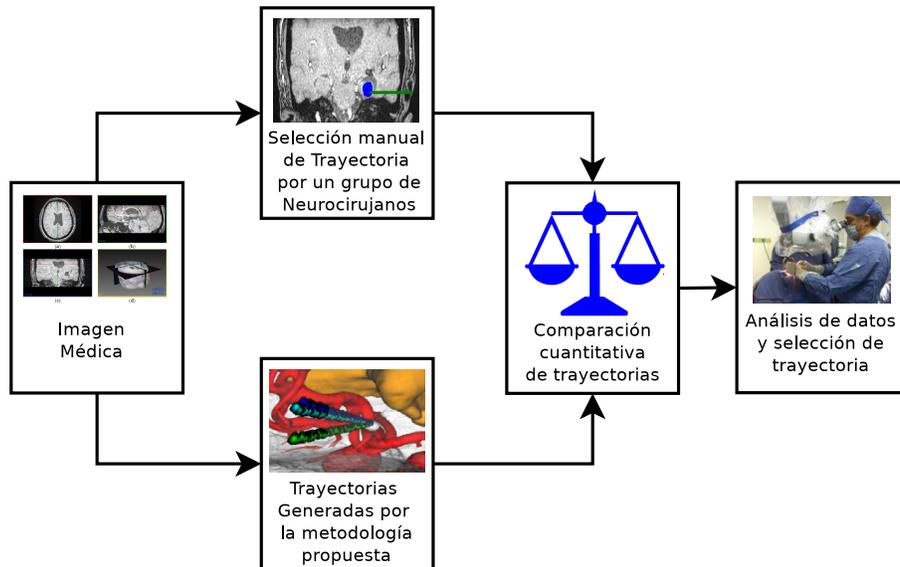


Figura 5.9: Flujo de trabajo realizado en el proceso de validación de la metodología propuesta.

La información obtenida en el comparativo realizado, así como la visualización de las trayectorias es mostrada al grupo de neurocirujanos con el objetivo de realizar un análisis de los datos y que lleven a cabo la selección de la trayectoria más apropiada para la intervención. La Figura 5.10 muestra las trayectorias más seguras obtenidas tanto de forma manual por el grupo de neurocirujanos, como las seleccionadas por la metodología propuesta.

Para cada caso se compararon las tres trayectorias más seguras con la trayectoria obtenida de forma manual por los neurocirujanos. La Tabla 5.1 muestra esta comparación.

Se puede observar en la Tabla 5.1 que en ambos casos de estudio el valor de riesgo obtenido para las trayectorias automáticas (correspondiente a la suma de los riesgos de todos los voxeles que forman parte de la trayectoria) es menor que los valores de riesgo para las trayectorias seleccionadas de forma manual. En cuanto a la longitud de la trayectoria podemos ver un comportamiento similar, ya que la longitud de las trayectorias obtenidas de forma automática son menores que las seleccionadas de forma manual. Otro valor de importancia a comparar es el de la distancia respecto a las estructuras de riesgo, en este parámetro se puede verificar que el valor para las trayectorias automáticas es mayor que el de las trayectorias seleccionadas manualmente, esto significa que las trayectorias automáticas se

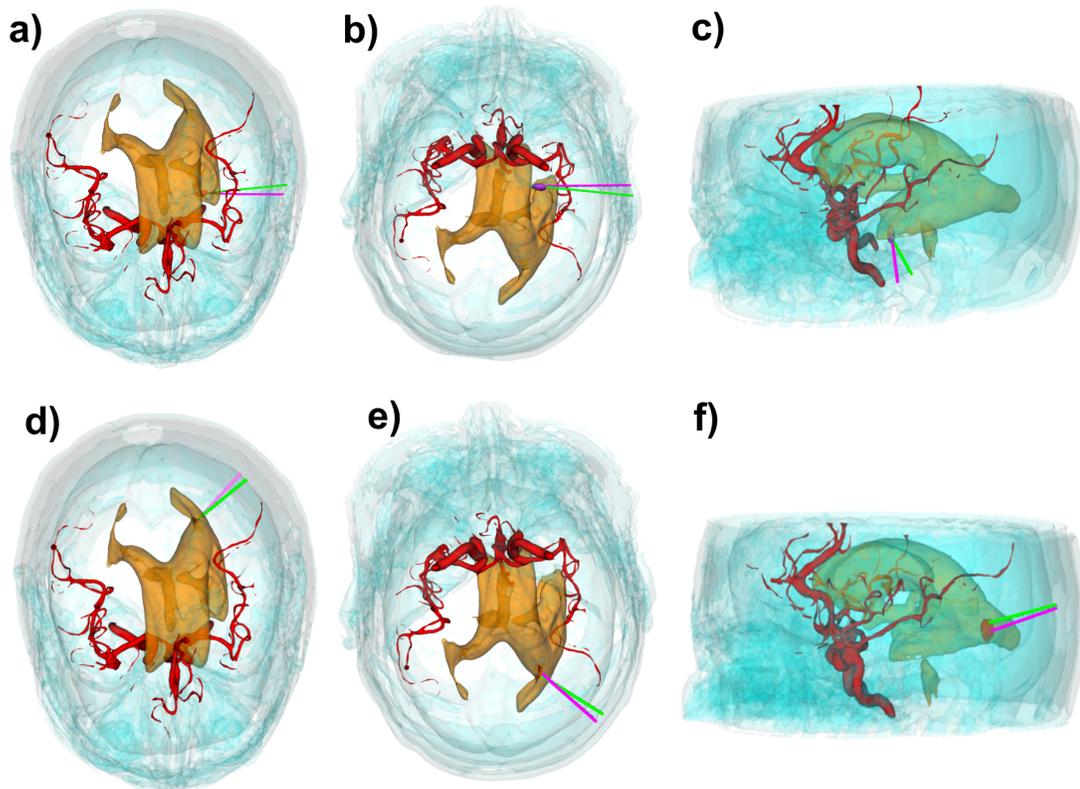


Figura 5.10: Trayectoria manual seleccionada por los neurocirujanos (color verde) y trayectoria segura obtenida por la metodología propuesta (color magenta). Trayectorias para la colocación de un electrodo en el hipocampo izquierdo a través de la segunda circunvolución temporal izquierda: a) Vista Superior, b) Vista Inferior, c) Vista Lateral Izquierda. Trayectorias para acceder a un tumor en el atrio intraventricular izquierdo: d) Vista Superior, e) Vista Inferior, f) Vista Lateral Izquierda.

alejan más de las estructuras de riesgo que las seleccionadas manualmente. En la trayectoria automática 1 para colocación de electrodo vemos una ligera excepción, ya que la distancia respecto a los vasos sanguíneos es ligeramente menor que la seleccionada manualmente (0.0445 mm.). Sin embargo, se puede observar que la distancia con respecto a los ventrículos es mayor, y debido a la gran cercanía de esta trayectoria con los ventrículos, el valor de riesgo de esta estructura genera un mayor impacto en el cálculo del valor de riesgo de los voxels. En cuanto al caso referente a la trayectoria para acceder al tumor intraventricular izquierdo, la distancia respecto a los ventrículos esta etiquetada como N/A debido a que el objetivo se encuentra dentro de los ventrículos, lo que ocasiona que esta distancia sea siempre cero. Para este caso, se puede observar que la longitud de la trayectoria es menor para las trayectorias automáticas, y la distancia respecto a los vasos sanguíneos es mayor.

Esta información cuantitativa en cuanto a la comparación de trayectorias, así como la visualización

Tabla 5.1: Comparación de trayectorias automáticas y manuales.

Descripción	Caso	Riesgo	LT	DVSMC	DVMC
Manual	Colocación de Electrodo	770.40	45.3096	14.5667	2.0400
Automática 1	Colocación de Electrodo	723.22	44.0630	14.6112	2.7037
Automática 2	Colocación de Electrodo	735.97	45.1669	14.4710	3.5700
Automática 3	Colocación de Electrodo	738.05	43.8923	14.5723	2.5500
Manual	Acceso a tumor	953.83	36.7429	28.5674	N/A
Automática 1	Acceso a tumor	746.93	34.0762	31.4266	N/A
Automática 2	Acceso a tumor	791.69	34.5863	30.4217	N/A
Automática 3	Acceso a tumor	867.39	36.7186	31.1091	N/A

LT, Longitud de la trayectoria (mm.); **DVSMC**, Distancia con el vaso sanguíneo más cercano (mm.); **DVMC**, Distancia con el ventrículo más cercano (mm.).

de las trayectorias en un modelo de reconstrucción 3D y en los cortes 2D se le presentaron a los expertos neurocirujanos para poder llevar a cabo la evaluación de las trayectorias obtenidas. Todos los expertos estuvieron de acuerdo que las 3 trayectorias obtenidas en ambos casos de estudio son opciones adecuadas para poder llevar a cabo una intervención quirúrgica. Los expertos remarcaron que a pesar de la cercanía de las trayectorias automáticas respecto a las seleccionadas manualmente, los parámetros de distancia respecto a estructuras de riesgo y longitud de la trayectoria entregan resultados mejores que la selección manual. Esto significa que la metodología se encarga de minimizar la longitud de la trayectoria y maximizar la distancia respecto a las estructuras de riesgo de una forma eficiente.

Uno de los principales problemas en el proceso de búsqueda de trayectorias de forma automática es el alto tiempo de procesamiento consumido debido a búsquedas exhaustivas. Estos tiempos generan un gran problema debido a que los tiempos de planeación en cirugía son cortos, por lo que se debe lograr que estos tiempos sean menores. Así, la metodología propuesta considera el empleo de algoritmos genéticos para evitar el proceso de búsqueda exhaustiva y por consecuencia, reducir significativamente el proceso de búsqueda de las trayectorias más seguras. La Tabla 5.2 muestra el total de trayectorias calculadas en ambos métodos, el tiempo de procesamiento consumido para la búsqueda de las trayectorias empleando algoritmos genéticos y el tiempo estimado para la búsqueda exhaustiva.

Como se puede observar, los tiempos de procesamiento empleando el algoritmo genético propuesto se reducen considerablemente, obteniendo un 99.9 % de reducción respecto al tiempo requerido por la búsqueda exhaustiva.

Tabla 5.2: Comparación de resultados de la aplicación de algoritmos genéticos y búsqueda exhaustiva.

Método	trayectorias calculadas	Tiempo de Procesamiento (seg)
Búsqueda Exhaustiva, Colocación de Electrodo	4,617,475,708	32,650,850.11
Búsqueda Exhaustiva, acceso a Tumor intraventricular	1,791,050,620	12,664,782.46
Algoritmo Genético, ambos casos	401,000	2,836.00

Con el objetivo de realizar una validación adicional, se obtuvo un mapa de riesgo diferente empleando el algoritmo 2 con el valor de $N = 1$. Este mapa de riesgo es el equivalente a la propuesta del trabajo de Shamir et al. [2, 3, 4]. Con dicho mapa se realizó la búsqueda de las trayectorias más seguras, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Trayectorias obtenidas con la metodología equivalente a la propuesta por Shamir et al. [2, 3, 4]

Metodología	Caso	DVSMC	DVMC
$N = 1$	Colocación de Electrodo	14.5400	2.5500
$N = 5$	Colocación de Electrodo	14.6112	2.7037
$N = 1$	Acceso a Tumor Intraventricular	30.9100	N/A
$N = 5$	Acceso a Tumor Intraventricular	31.4266	N/A

DVSMC, Distancia al Vaso Sanguíneo más Cercano (mm.); **DVMC**, Distancia al Ventrículo más Cercano (mm.).

En la Tabla 5.3 se puede comparar los resultados de la metodología con el mapa de riesgo con valor de $N = 5$ respecto a los resultados obtenidos con la metodología equivalente al trabajo de Shamir et al. [2, 3, 4] con mapa de riesgo para $N = 1$. A pesar que los resultados con la metodología de $N = 1$ muestran distancias menores respecto a la selección manual del grupo de neurocirujanos, la metodología mostrada en el presente trabajo muestra distancias aún mayores, lo que lleva a concluir que los resultados obtenidos con la metodología desarrollada son más seguros.

Todas las pruebas fueron llevadas a cabo en una laptop con procesador Intel® Core™ i5-3317U (2.6 GHz, 3MB L3 Cache), 4 GB en memoria RAM y sistema operativo Ubuntu 18.04.1 de 64-bit.

*Si supiera que el mundo se acaba mañana, yo, hoy
todavía, plantaría un árbol.*

Martin Luther King, Jr

6

Conclusiones y Trabajo Futuro

El objetivo principal de este trabajo es el de desarrollar un sistema para planeación de trayectorias aplicable a neurocirugía intracraneal tipo cerradura, encontrando las trayectorias más seguras aplicables a distintos tipos de intervenciones y con la capacidad de ser personalizados en casos particulares.

Las aportaciones que este trabajo trae consigo son: la definición de un mapa de entrada más preciso, con una transición más suave en los valores de riesgo etiquetados para cada voxel dentro del área cerebral; y la implementación de técnicas de búsqueda heurística en el proceso de búsqueda de las trayectorias más seguras, mejorando notablemente el tiempo de procesamiento.

Empleando distintas técnicas y herramientas se logró integrar la metodología propuesta obteniendo resultados adecuados con respecto a los resultados obtenidos en el proceso de validación.

Las conclusiones que se derivan del trabajo de investigación que se presenta se basan en el experimento de validación realizado por un grupo de neurocirujanos con amplia experiencia, liderados por el Dr. Jaime G. Torres Corzo, expresidente de la Sociedad Mexicana de Cirugía Neurológica, con 28 años de experiencia en el campo. Los miembros del grupo de neurocirujanos son socios activos de la Sociedad Mexicana de Cirugía Neurológica, con al menos 13 años de pertenecer a dicha sociedad, con experiencia en Cirugía Cerebro-Vascular, Neuroendoscopia, Cirugía de Columna, Nervio Periférico, Neuro-Oncología, Neuro-Traumatología, Neurocirugía Funcional y Estereotáctica y Neurocirugía Pediátrica. Entre las actividades que han realizado los miembros del grupo de neurocirujanos en distintos periodos se pueden resaltar las siguientes: Profesores Investigadores, Presidencia del Colegio Potosino de Neurocirugía, Fundación y Presidencia del Patronato de Enfermedades Neurológicas A.C., Fundación de la Clínica de Epilepsia y el Programa de Cirugía de Epilepsia del Hospital Central Dr. Ignacio Morones Prieto, y la Jefatura del Servicio de Neurocirugía del Hospital Central Dr. Ignacio Morones Prieto, entre otras.

El grupo de expertos revisó ampliamente la información obtenida en el proceso de validación. La conclusión a la que llegaron es que las trayectorias obtenidas por la metodología son adecuadas para los casos de estudios seleccionados como experimentos de prueba. Tomando en consideración los valores cuantitativos de comparación de las trayectorias obtenidas por la metodología respecto a las que fueron seleccionadas por los expertos, se concluye que la metodología puede ser empleada adecuadamente como un sistema de asistencia en el proceso de toma de decisiones para planeación de trayectorias. Esto puede brindar información muy importante a cirujanos con poca experiencia, con el objetivo de poder alcanzar una mejor decisión preoperatoria en cuanto a la ruta a seguir en el proceso intraoperatorio, y dando mejores resultados en una recuperación postoperatoria del paciente.

La metodología propuesta brinda mejoras significativas con respecto a los trabajos previos, al analizar los mejores puntos de las metodologías e integrarlos, y brindando mejoras en el cálculo del mapa de riesgo al considerar más elementos de riesgo en el cálculo de riesgo de un voxel, lo cual deriva en un mapa de riesgo con valores que cambian de forma gradual de una forma suave, con respecto a las estructuras que lo rodean. Al comparar los resultados de la presente propuesta con respecto al trabajo realizado por Shamir et al. [2, 3, 4], se concluye que al ampliar la cantidad de voxeles de riesgo cercanos a un voxel cualquiera en el mapa de riesgo, se obtienen trayectorias más seguras que se alejan más de las estructuras anatómicas de riesgo.

En cuanto al tiempo de procesamiento, el emplear algoritmos genéticos en el proceso de búsqueda de trayectorias reduce significativamente el tiempo de procesamiento, lo cual hace el sistema más apto en cuanto a las necesidades de tiempo de los neurocirujanos.

La metodología incluso puede ser integrada con sistemas de navegación para poder brindar esta información en el proceso intraoperatorio, dando soporte en cuanto al seguimiento adecuado de la trayectoria seleccionada o incluso adaptando la trayectoria en tiempo real.

Como trabajo futuro del presente trabajo, la mejora en el tiempo de procesamiento en el algoritmo de etiquetado actual puede significar un gran adelanto debido a que los cirujanos podrán tener resultados en un menor tiempo. A pesar que el proceso preoperatorio requiere un tiempo considerable en el cual se puede esperar por resultados, en algunas ocasiones en casos de urgencia, el tener resultados en un periodo de tiempo corto puede ser una gran ayuda para el neurocirujano.

En el proceso de búsqueda de trayectorias, se sugiere como trabajo futuro la implementación de este proceso mediante otras técnicas de inteligencia artificial con el objetivo de comparar el funcionamiento respecto al algoritmo genético simple implementado en el presente trabajo. Se pueden considerar diversos métodos como optimización por colonia de hormigas, algoritmo de colonia artificial de abejas o incluso considerar la optimización multiobjetivo mediante algoritmos genéticos.

Una oportunidad de mejorar esta metodología es considerando información adicional de entrada, diferente de las estructuras de riesgo tradicionales. Por ejemplo, las Imágenes por Tensor de Difusión (DTI) o Tractografías de Materia Blanca (WMT) son técnicas muy prometedoras para conocer el curso y los patrones de conectividad de las estructuras de la materia blanca [78]. Con la información obtenida a partir de una tractografía, los neurocirujanos pueden tomar decisiones muy radicales como el uso de abordajes que preserven tractos desplazados o incluso, emplear abordajes mas agresivos al notar que los tractos estén casi destruidos. Otra mejora es el empleo de áreas de interés, empleando Imágenes de Resonancia Magnética Funcional (fMRI), mediante la cual se puede localizar la dominancia hemisférica y las áreas particulares de interés como la corteza motora, áreas de lenguaje esencial, entre otras [79].



Instalación de Bibliotecas VTK / ITK en Sistemas Operativos Linux

A continuación se describe el proceso de instalación en sistemas operativo Linux de las herramientas VTK/ITK, así como otras librerías necesarias. Se describe en dicho sistema operativo debido a que la instalación en un sistema operativo Windows® se realiza mediante el instalador, por lo cual es más sencillo.

El conjunto de herramientas de visualización (VTK), así como el de herramientas de registro y segmentación de imágenes (ITK), son sistemas de software libre desarrollado por la compañía Kitware, con el objetivo de brindar las herramientas de trabajo para sistemas de visualización y procesamiento de información proveniente de imágenes médicas.

Las herramientas del conjunto de herramientas VTK se emplean en sistemas en que se requiere

procesamiento y visualización de datos. Es ampliamente utilizado en sistemas en que se requiere visualización de imágenes médicas, geometría computacional y manejo de datos volumétricos.

La biblioteca de herramientas ITK se emplea fundamentalmente para sistemas en que se requiera el procesamiento de imágenes digitales, en donde se apliquen diversas acciones a las mismas como son los filtros, la segmentación y el registro de imágenes.

El presente trabajo emplea ITK / VTK en múltiples actividades, por lo cual es necesario instalar dichas herramientas en el sistema. A continuación se presentan las instrucciones de instalación para ambas herramientas.

HERRAMIENTAS PARA COMPILACIÓN

Para poder compilar los archivos de las bibliotecas ITK/VTK, es necesario instalar algunos programas y bibliotecas adicionales.

Una de las herramientas que se debe instalar es la librería de propósito general HDF5 (Hierarchical Data Format). Con esta, se incluye un formato de ficheros para el almacenamiento de datos científicos. Se puede descargar de la página oficial <https://www.hdfgroup.org/HDF5/>.

Otra herramienta a instalar es el lenguaje de herramientas de comando TCL. Este se puede descargar de la página oficial <http://www.activestate.com/activetcl>.

Una herramienta que si bien no es indispensable si es ideal instalar es el generador de documentación Doxygen. Este se puede descargar desde la página oficial <http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/>.

INSTALACIÓN DE ITK

Para instalar el ITK, se debe descargar el paquete de la librería de la página oficial <http://www.itk.org/ITK/resources/software.html>.

Una vez que se descargó el archivo, se debe extraer el contenido del paquete en la carpeta de usuario, en una subcarpeta llamada ITK. Por ejemplo: /Desarrollo/ITK.

En la carpeta ITK, crear una subcarpeta llamada ITKBin. Por ejemplo: /Desarrollo/ITK/ITKBin.

En la terminal, dirigirse a la carpeta ITKBin y ejecutar el comando `cmake ../InsightToolkit-5.0.1 -Wno-dev`. El archivo seleccionado corresponde a la versión de ITK descargada, para este ejemplo se descargó la versión 5.0.1.

Dentro de la pantalla de cmake, presionar la tecla “c” con la intención de configurar los parámetros. Seleccionar las opciones deseadas y volver a oprimir la tecla “c”.

Oprimir la tecla “g” para generar el archivo de configuración, y posteriormente, en la terminal escribir el comando “`make -j4`” para compilar y esperar a que finalice.

Finalmente, escribir el comando “`sudo make install`” para terminar la instalación.

INSTALACIÓN DE VTK

La instalación de la biblioteca VTK es muy similar al proceso llevado a cabo en la instalación de ITK. Comenzamos descargando el paquete de la librería VTK de la página oficial <https://vtk.org/download/>.

Se extrae el contenido del paquete en la carpeta de usuario, en una subcarpeta llamada VTK. Por ejemplo: /Desarrollo/VTK.

En la carpeta VTK, crear una subcarpeta llamada VTKBin. Por ejemplo: /Desarrollo/VTK/VTKBin.

En la terminal, dirigirse a la carpeta VTKBin y ejecutar el comando `cmake ../VTK-8.2.0 -Wno-dev`. El archivo seleccionado corresponde a la versión de VTK descargada, para este ejemplo se descargó la versión 8.2.0.

Dentro de la pantalla de cmake, presionar la tecla “c” con la intención de configurar los parámetros. Seleccionar las opciones deseadas y volver a oprimir la tecla “c”.

Oprimir la tecla “g” para generar el archivo de configuración, y posteriormente, en la terminal escribir el comando “`make -j4`” para compilar y esperar a que finalice.

Finalmente, escribir el comando “`sudo make install`” para terminar la instalación.

Bibliografía

- [1] A. Perneczky and R. Reisch, *Keyhole Approaches in Neurosurgery: Volume 1: Concept and Surgical Technique*, ser. Keyhole Approaches in Neurosurgery. Springer-Verlag, 2008. [Online]. Available: <https://www.springer.com/la/book/9783211695012>
- [2] R. R. Shamir, I. Tamir, E. Dabool, L. Joskowicz, and Y. Shoshan, *A Method for Planning Safe Trajectories in Image-Guided Keyhole Neurosurgery*. Springer Berlin Heidelberg, 2010, vol. 6363, p. 457–464. [Online]. Available: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-15711-0_57
- [3] R. R. Shamir, M. Horn, T. Blum, J. Mehrkens, Y. Shoshan, L. Joskowicz, and N. Navab, “Trajectory planning with augmented reality for improved risk assessment in image-guided keyhole neurosurgery,” in *2011 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro*. IEEE, Mar 2011, p. 1873–1876. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5872773/>
- [4] R. R. Shamir, L. Joskowicz, I. Tamir, E. Dabool, L. Pertman, A. Ben-Ami, and Y. Shoshan, “Reduced risk trajectory planning in image-guided keyhole neurosurgery: Reduced risk trajectory planning in image-guided keyhole neurosurgery,” *Medical Physics*, vol. 39, no. 5, p. 2885–2895, May 2012.
- [5] N. V. Navkar, N. V. Tsekos, J. R. Stafford, J. S. Weinberg, and Z. Deng, *Visualization and Planning of Neurosurgical Interventions with Straight Access*. Springer Berlin Heidelberg, 2010, vol. 6135, p. 1–11. [Online]. Available: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-13711-2_1
- [6] C. Aine, *A conceptual overview and critique of functional neuroimaging techniques in humans: I. MRI/fMRI and PET*, Feb 1995, vol. 9.
- [7] S. Jacobson, *Neuroanatomy for the neuroscientist*. Springer Science+Business Media, 2017.

- [8] E. Hillman, “El flujo sanguíneo en el cerebro,” *Mente y Cerebro*, vol. 75, 2015. [Online]. Available: <https://www.investigacionyciencia.es/revistas/mente-y-cerebro/evaluar-la-personalidad-654/el-flujo-sanguneo-en-el-cerebro-13698>
- [9] M. Sevillano García, P. Cacabelos Pérez, and J. Cacho Gutiérrez, “Alteraciones del líquido cefalorraquídeo y de su circulación: hidrocefalia, pseudotumor cerebral y síndrome de presión baja,” *Medicine - Programa de Formación Médica Continuada Acreditado*, vol. 10, no. 71, p. 4814–4824, Feb 2011.
- [10] M. Vaillant, C. Davatzikos, R. H. Taylor, and R. N. Bryan, *A path-planning algorithm for image-guided neurosurgery*. Springer Berlin Heidelberg, 1997, vol. 1205, p. 467–476. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/BFb0029269>
- [11] J. Tailarach and P. Tournoux, *Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain*, 1st ed. Thieme, Jan 1988.
- [12] W. Nowinski, G. L. Yang, and T. T. Yeo, “Computer-aided stereotactic functional neurosurgery enhanced by the use of the multiple brain atlas database,” *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 19, no. 1, p. 62–69, Jan 2000.
- [13] W. L. Nowinski, A. Fang, B. T. Nguyen, J. K. Raphel, L. Jagannathan, R. Raghavan, R. N. Bryan, and G. A. Miller, “Multiple brain atlas database and atlas-based neuroimaging system,” *Computer Aided Surgery: Official Journal of the International Society for Computer Aided Surgery*, vol. 2, no. 1, p. 42–66, 1997.
- [14] J.-D. Lee, C.-H. Huang, and S.-T. Lee, “Improving stereotactic surgery using 3-d reconstruction,” *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 21, no. 6, p. 109–116, Nov 2002.
- [15] G. Schaltenbrand and W. Wahren, “Atlas for stereotaxy of the human brain,” 1977. [Online]. Available: <https://www.thieme.com/books-main/neurosurgery/product/168-atlas-for-stereotaxy-of-the-human-brain>
- [16] T. Fujii, H. Asakura, H. Emoto, N. Sugou, T. Mito, and I. Shibata, “Automatic path searching for minimally invasive neurosurgical planning,” in *Automatic path searching for minimally invasive neurosurgical planning*, S. K. Mun, Ed., May 2002, p. 527–538. [Online]. Available: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=879040>

- [17] R. Hemalatha, T. Thamizhvani, A. Dhivya, J. Joseph, B. Babu, and R. Chandrasekaran, *Active Contour Based Segmentation Techniques for Medical Image Analysis*, Jul 2018.
- [18] T. Fujii, H. Emoto, N. Sugou, T. Mito, and I. Shibata, “NeuroPath planner—automatic path searching for neurosurgery,” *International Congress Series*, vol. 1256, p. 587–596, Jun 2003.
- [19] N. Bourbakis and M. Awad, “A 3-d visualization method for image-guided brain surgery,” *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 33, no. 5, p. 766–781, Oct 2003.
- [20] E. J. L. Brunenberg, A. Vilanova, V. Visser-Vandewalle, Y. Temel, L. Ackermans, B. Platel, and B. M. ter Haar Romeny, *Automatic Trajectory Planning for Deep Brain Stimulation: A Feasibility Study*. Springer Berlin Heidelberg, 2007, vol. 4791, p. 584–592. [Online]. Available: http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-75757-3_71
- [21] T. Guo, A. G. Parrent, and T. M. Peters, “Automatic target and trajectory identification for deep brain stimulation (dbs) procedures,” *Medical image computing and computer-assisted intervention: MICCAI ... International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, vol. 10, no. Pt 1, p. 483–490, 2007.
- [22] P. Tirelli, E. De Momi, N. Borghese, and G. Ferrigno, “Computer assisted neurosurgery,” *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, vol. 4, no. S1, p. 85–91, Jun 2009.
- [23] C. Essert, C. Haegelen, F. Lallys, A. Abadie, and P. Jannin, “Automatic computation of electrode trajectories for deep brain stimulation: a hybrid symbolic and numerical approach,” *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, vol. 7, no. 4, p. 517–532, Jul 2012.
- [24] W. E. Lorensen and H. E. Cline, “Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm,” in *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ser. SIGGRAPH '87. ACM, 1987, p. 163–169. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/37401.37422>
- [25] M. Rincon-Nigro, N. V. Navkar, N. V. Tsekos, and Z. Deng, “Gpu-accelerated interactive visualization and planning of neurosurgical interventions,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 34, no. 1, p. 22–31, Jan 2014.

- [26] A. De León-Cuevas, S. Tovar-Arriaga, A. González-Gutiérrez, and M. A. Aceves-Fernández, “Risk map generation for keyhole neurosurgery using fuzzy logic for trajectory evaluation,” *Neurocomputing*, vol. 233, p. 81–89, Apr 2017.
- [27] N. Hamze, P. Collet, and C. Essert, “Evolutionary approaches for surgical path planning: A quantitative study on deep brain stimulation,” in *2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. IEEE, Jun 2017, p. 1087–1094. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7969428/>
- [28] A. B. Valadka and C. S. Robertson, “Surgery of cerebral trauma and associated critical care,” *Neurosurgery*, vol. 61, no. 1 Suppl, pp. 203–220; discussion 220–221, Jul 2007.
- [29] A. B. Verger-Kuhnke, M. A. Reuter, and M. L. Beccaría, “La biografía de maximilian nitze (1848-1906) y su contribución a la urología,” *Actas Urológicas Españolas*, vol. 31, no. 7, p. 697–704, Jan 2007.
- [30] G. Litynski and V. Paolucci, “Origin of laparoscopy: Coincidence or surgical interdisciplinary thought?” *World Journal of Surgery*, vol. 22, no. 8, p. 899–902, Aug 1998.
- [31] A. M. M. Bernal, C. A. P. Trujillo, and R. A. Marín, “Manejo con neuroendoscopia cerebral de quistes aracnoideos e hidrocefalia en el hospital departamental santa sofia de caldas,” *Universidad Nacional de Colombia*, p. 143, 2013.
- [32] J. E. Wickham, “Minimally invasive surgery. future developments.” *BMJ: British Medical Journal*, vol. 308, no. 6922, p. 193–196, Jan 1994.
- [33] T. González León, E. Rodríguez Verde, and A. Núñez Roca, “Consideraciones sobre la cirugía endoscópica transluminal a través de un orificio natural,” *Revista Cubana de Medicina Militar*, vol. 40, no. 3–4, p. 285–294, Dec 2011.
- [34] B. V and O. Marcelo, “Abordajes craneanos mínimamente invasivos tipo keyhole para patología neuroquirúrgica,” *Revista Médica Clínica Las Condes*, vol. 19, no. 5, p. 590–594, Nov 2008.
- [35] M. Naiouf, A. E. De Giusti, L. C. De Giusti, F. Chichizola, V. M. Sanz, A. Pousa, E. Rucci, S. Gallo, E. Montes de Oca, F. E. Frati, and et al., “Cómputo de altas prestaciones, fundamentos de cómputo paralelo y distribuido, construcción y evaluación de aplicaciones,” Apr 2017. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10915/62559>

- [36] S. Mittal and J. Vetter, "A survey of cpu-gpu heterogeneous computing techniques," *ACM Computing Surveys*, vol. 47, Jul 2015.
- [37] A. Khokhar, V. Prasanna, M. Shaaban, and C.-L. Wang, "Heterogeneous computing: challenges and opportunities," *Computer*, vol. 26, no. 6, p. 18–27, Jun 1993.
- [38] R. Duncan, "A survey of parallel computer architectures," *Computer*, vol. 23, no. 2, p. 5–16, Feb 1990.
- [39] M. J. Flynn and K. W. Rudd, "Parallel architectures," *ACM Comput. Surv.*, vol. 28, no. 1, p. 67–70, Mar 1996.
- [40] M. A. Dávila-Guzmán, W. Alfonso-Morales, and E. F. Caicedo-Bravo, "Arquitectura heterogénea para el procesamiento de los algoritmos de enjambres," *TecnoLógicas*, vol. 17, no. 32, p. 11, Jan 2014.
- [41] M. Garland, S. Le Grand, J. Nickolls, J. Anderson, J. Hardwick, S. Morton, E. Phillips, Y. Zhang, and V. Volkov, "Parallel computing experiences with cuda," *IEEE Micro*, vol. 28, no. 4, p. 13–27, Jul 2008.
- [42] A. Cano, "A survey on graphic processing unit computing for large-scale data mining: A survey on gpu computing for large-scale data mining," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 8, no. 1, p. e1232, Jan 2018.
- [43] C. R. Reeves, *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. John Wiley and Sons, Inc., 1993.
- [44] F. Glover, "Fred glover leeds school of business university of colorado at boulder. búsqueda tabú," p. 21.
- [45] M. Mitchell and J. Holland, "When will a genetic algorithm outperform hill-climbing?" *Santa Fe Institute, Working Papers*, Jan 1993.
- [46] T. Bäck, *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms*. Oxford University Press, Inc., 1996.
- [47] C. A. Coello Coello, "A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization techniques," *Knowledge and Information Systems*, vol. 1, no. 3, p. 269–308, Aug 1999.

- [48] A. M. Turing, "I.—computing machinery and intelligence," *Mind*, vol. LIX, no. 236, p. 433–460, Oct 1950.
- [49] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*. MIT Press, 1992.
- [50] J. McCall, "Genetic algorithms for modelling and optimisation," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 184, no. 1, p. 205–222, Dec 2005.
- [51] A. Shukla, H. M. Pandey, and D. Mehrotra, "Comparative review of selection techniques in genetic algorithm," in *2015 International Conference on Futuristic Trends on Computational Analysis and Knowledge Management (ABLAZE)*. IEEE, Feb 2015, p. 515–519. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7154916/>
- [52] J. Zhong, X. Hu, J. Zhang, and M. Gu, "Comparison of performance between different selection strategies on simple genetic algorithms," in *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*, vol. 2, Nov 2005, p. 1115–1121.
- [53] P. Kalavathi, M. Senthamilselvi, and V. Prasath, "Review of computational methods on brain symmetric and asymmetric analysis from neuroimaging techniques," *Technologies*, vol. 5, no. 2, p. 16, Apr 2017.
- [54] S. Zachow, M. Zilske, and H.-C. Hege, "3d reconstruction of individual anatomy from medical image data: Segmentation and geometry processing," p. 13, 2007.
- [55] P. Mildenerger, M. Eichelberg, and E. Martin, "Introduction to the dicom standard," *European Radiology*, vol. 12, no. 4, p. 920–927, Apr 2002.
- [56] O. S. Pianykh, *Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM): A Practical Introduction and Survival Guide*. Springer Science and Business Media, Oct 2009, google-Books-ID: GpQmSXqhDcMC.
- [57] I. Wolf, M. Vetter, I. Wegner, T. Böttger, M. Nolden, M. Schöbinger, M. Hastenteufel, T. Kunert, and H.-P. Meinzer, "The medical imaging interaction toolkit," *Medical Image Analysis*, vol. 9, no. 6, p. 594–604, Dec 2005.

- [58] “Medical imaging interaction toolkit: The mitk user manual.” [Online]. Available: <http://docs.mitk.org/2018.04/MITKUserManualPage.html>
- [59] M. Nolden, S. Zelzer, A. Seitel, D. Wald, M. Müller, A. M. Franz, D. Maleike, M. Fangerau, M. Baumhauer, L. Maier-Hein, and et al., “The medical imaging interaction toolkit: challenges and advances: 10 years of open-source development,” *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, vol. 8, no. 4, p. 607–620, Jul 2013.
- [60] W. J. Schroeder, L. S. Avila, and W. Hoffman, “Visualizing with vtk: a tutorial,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 20, no. 5, p. 20–27, Sep 2000.
- [61] *The VTK user’s guide: install, use and extend the visualization toolkit; covers installation on PC, Unix, and Mac OSX, includes example scripts, C++ source code, images and data, shows how to extend VTK for your own applications*, 11th ed. Kitware, 2010.
- [62] Y. M. A. Contreras, “Desarrollo de una aplicación para visualizar, manipular y fusionar volúmenes médicos,” p. 99, 2013.
- [63] O. Märtens, “3d visualization and segmentation of lungs using itk/vtk/qt framework,” p. 79, 2017.
- [64] L. Ibanez, “(pdf) the itk software guide,” 2003. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/324017848_The_ITK_Software_Guide
- [65] T. S. Yoo, *Insight into Images: Principles and Practice for Segmentation, Registration, and Image Analysis*. AK Peters Ltd, 2004.
- [66] C. G. G. Calderón, “Segmentación de imágenes médicas mediante algoritmos de colonia de hormigas,” Ph.D. dissertation, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, 2014.
- [67] I. Bankman, *Handbook of Medical Image Processing and Analysis - 2nd Edition*, 2nd ed., 2008. [Online]. Available: <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-medical-image-processing-and-analysis/bankman/978-0-12-373904-9>
- [68] W.-X. Kang, Q.-Q. Yang, and R.-P. Liang, “The comparative research on image segmentation algorithms,” in *2009 First International Workshop on Education Technology and Computer Science*. IEEE, 2009, p. 703–707. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4959132/>

- [69] S. Trukhan, A. Nedzved, and S. Ablameyko, “Region growing segmentation of ct-image by the analysis of 3d local neighborhood,” p. 5, 2014.
- [70] G. Andrade-Miranda and J. I. Godino-Llorente, “Seguimiento autom´atico de la apertura glotal a partir de im´agenes digitales de alta velocidad usando correlaci´on cruzada adaptiva.” p. 11, 2013.
- [71] S. B´eriault, F. Al Subaie, K. Mok, A. F. Sadikot, and G. B. Pike, “Automatic trajectory planning of dbs neurosurgery from multi-modal mri datasets,” *Medical image computing and computer-assisted intervention: MICCAI ... International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, vol. 14, no. Pt 1, p. 259–266, 2011.
- [72] J. Kennedy, *Swarm Intelligence*. Springer US, 2006, p. 187–219. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/0-387-27705-6_6
- [73] M. Dorigo and C. Blum, “Ant colony optimization theory: A survey,” *Theoretical Computer Science*, vol. 344, no. 2, p. 243–278, Nov 2005.
- [74] D. Karaboga and B. Basturk, “Artificial bee colony (abc) optimization algorithm for solving constrained optimization problems,” in *Foundations of Fuzzy Logic and Soft Computing*, ser. Lecture Notes in Computer Science, P. Melin, O. Castillo, L. T. Aguilar, J. Kacprzyk, and W. Pedrycz, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2007, p. 789–798.
- [75] A. Chipperfield, “The matlab genetic algorithm toolbox,” in *IEE Colloquium on Applied Control Techniques Using MATLAB*, vol. 1995. IEE, 1995, p. 10–10. [Online]. Available: http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/ic_19950061
- [76] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, 1st ed. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.
- [77] J. E. Bresenham, “Algorithm for computer control of a digital plotter,” *IBM Systems Journal*, vol. 4, no. 1, p. 25–30, 1965.
- [78] X. Chen, D. Weigel, O. Ganslandt, M. Buchfelder, and C. Nimsky, “Diffusion tensor imaging and white matter tractography in patients with brainstem lesions,” *Acta Neurochirurgica*, vol. 149, no. 11, p. 1117–1131, Nov 2007.
- [79] A. Tieleman, K. Deblaere, D. Van Roost, O. Van Damme, and E. Achten, “Preoperative fmri in tumour surgery,” *European Radiology*, vol. 19, no. 10, p. 2523–2534, Oct 2009.



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA

TESIS presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí para obtener el grado de Doctor en Ciencias de la Computación.

Iván Villanueva Naquid
ivan.naquid@uaslp.mx.

Octubre, 2019