



**MODELADO 3D DE CARTÍLAGOS LARÍNGEOS PERTENECIENTES AL LABORATORIO DE
ANATOMÍA DE UNA UNIVERSIDAD DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO A PARTIR DE
ANÁLISIS MORFOMÉTRICO: ESTUDIO EXPLORATORIO**

DIEGO ANDRÉS RIVERA LATORRE

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE SALUD
ESCUELA DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE MORFOLOGÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOMÉDICAS
JUNIO DE 2025**



**MODELADO 3D DE CARTÍLAGOS LARÍNGEOS PERTENECIENTES AL LABORATORIO DE
ANATOMÍA DE UNA UNIVERSIDAD DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO A PARTIR DE
ANÁLISIS MORFOMÉTRICO: ESTUDIO EXPLORATORIO**

**DIEGO ANDRÉS RIVERA LATORRE
202302123**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN CIENCIAS
BIOMÉDICAS**

**TUTORES:
ALEJANDRO RODRÍGUEZ CAMPO
FONOAUDIÓLOGO, MAGISTER EN CIENCIAS BIOMÉDICAS
SONIA OSORIO TORO
FISIOTERAPEUTA, MAGISTER EN CIENCIAS BIOMÉDICAS, DOCTORA EN EDUCACIÓN**

**COTUTORA:
NATHALIA DIAZ VALLEJO
INGENIERA DE MATERIALES, DOCTORA EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE SALUD
ESCUELA DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE MORFOLOGÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOMÉDICAS
JUNIO DE 2025**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Directora Programa Académico en Ciencias Biomédicas: Liliana Salazar Monsalve

Jurado 1: María Esperanza Sastoque Hernández

Jurado 2: Paulo Cesar Calvo Echeverry

Jurado 3: Jorge Alirio Holguín Ruiz

Ciudad y fecha _____

DEDICATORIA

Este logro es un tributo a quienes han sido mi pilar. A mi madre, Rosa, y a mi hermana, Katherine, quienes, con su amor incondicional y su fortaleza inquebrantable, han sido el motor que impulsa cada paso en mi vida y en este proyecto. A mi padre, Diego, por moldearme académicamente. A mis hermanos, Manuel y Fabián, por su apoyo incondicional y por la alegría que aportan a mi vida.

Mis más sinceros sentimientos a mis padrinos, Yanibe y Giovanni, quienes con su guía y cariño me han acompañado toda mi vida, ayudándome a ser la persona que soy hoy. A mi familia entera, cuya unión y valores me han brindado la base sólida de mi identidad.

Este camino también lo compartí con mi novia, Daniela, compañera de vida y apoyo incondicional, que con su paciencia y comprensión ha compartido cada etapa del desarrollo de este trabajo. Por supuesto, a mi fiel compañero, Toby Fernando, cuya alegría y presencia constante han sido un remanso de paz y una fuente de inspiración a lo largo de mi proceso de crecimiento personal y profesional.

Finalmente, este trabajo está dedicado a mi tutor y amigo, Alejandro Rodríguez, por su invaluable guía, su fe en mi potencial y por no permitirme nunca desistir, incluso ante los desafíos más grandes.

AGRADECIMIENTO

La culminación de este trabajo es el resultado del invaluable apoyo de muchas personas e instituciones. Mi profundo agradecimiento a mis tutores, Sonia, Alejandro y Nathalia, quienes me acompañaron y guiaron con sus conocimientos y experiencia a lo largo de este proceso de aprendizaje.

A las docentes Jelen Vanessa López y Liliana Salazar, por brindarme valiosos conocimientos y desarrollar habilidades fundamentales desde sus campos, priorizando siempre mi crecimiento académico. De igual manera, extendiendo mi gratitud a la docente Luz Edith, por su constante disposición a brindarme las herramientas y los espacios necesarios para el desarrollo de esta investigación. A los profesores y al personal del Departamento de Morfología, por todo el amor y la dedicación que siempre entregan.

A mi amigo Luis, por su acompañamiento incondicional en todo momento, brindándome soporte y ánimo.

Agradecimiento al Laboratorio de Fabricación Digital adscrito a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle, a su personal y coordinador Daniel Arias y Fernando Luna, por su disposición y apoyo para el desarrollo del presente trabajo

Un agradecimiento especial al Departamento de Innovación en Material Biológico de la Universidad Autónoma de México, por su calidez y por el apoyo invaluable en mi formación.

Un agradecimiento, además, al Programa de Doctorado en Ciencias Morfológicas y al Centro de Excelencia en Estudios Morfológicos y Quirúrgicos de la Universidad de la Frontera, Chile, por su apoyo, dedicación y las oportunidades brindadas.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	14
1. INTRODUCCIÓN	16
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y SU JUSTIFICACIÓN.....	17
3. REFERENTE TEÓRICO.....	19
3.1. ANTECEDENTES.....	19
3.2. MARCO CONCEPTUAL.....	20
3.2.1. LARINGE	20
3.2.2. MORFOMETRÍA	24
3.2.3. MORFOMETRÍA LARÍNGEA	25
3.2.4. TECNOLOGÍA DE ESCANEEO, MODELADO E IMPRESIÓN 3D EN ANATOMÍA	28
3.2.4.1. Tecnología de escaneo 3D.....	28
3.2.4.2. Modelado e impresión 3D	29
3.2.4.3. Aplicaciones y beneficios en la educación anatómica	29
3.2.5. MODELADO E IMPRESIÓN 3D DE LARINGE	30
3.2.6. PROTOCOLOS OPERATIVOS ESTANDARIZADOS.....	31
4. OBJETIVOS.....	33
4.1. OBJETIVO GENERAL	33
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
5. METODOLOGÍA.....	34
5.1. TIPO DE ESTUDIO.....	34
5.2. POBLACIÓN Y MUESTRA	34
5.3. CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN	34
5.3.1. Criterios de inclusión.....	34
5.3.2. Criterios de exclusión.....	35
5.4. LABORATORIOS DE TRABAJO.....	35
5.4.1. Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle	35
5.4.2. Laboratorio Estratégico Compartido (LEC) de Fabricación Digital	35
5.5. VARIABLES	35
5.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS.....	37
5.7. CONSIDERACIONES ÉTICAS.....	38
5.8. DESARROLLO METODOLÓGICO	39
5.8.1. Fase I: Consolidación del proyecto y autorizaciones	40
5.8.2. Fase II: Revisión del estado del arte y preparación de especímenes	40
5.8.2.1. Revisión del estado del arte.....	41
5.8.2.2. Acercamiento a especímenes laríngeos – Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle	44
5.8.2.2.1. Técnicas de recuperación y conservación.....	46
5.8.3. Elaboración y validación de POE de disección de laringe	47
5.8.3.1. Acercamiento a instrumentos para modelado 3D – Laboratorio de Fabricación Digital	49
5.8.3.1.1. Evaluación técnica del escáner EinScan Pro HD	49

5.8.3.1.2.	<i>Proceso de calibración de escáner</i>	50
5.8.3.1.3.	<i>Diseño y fabricación de soportes anatómicos</i>	51
5.8.3.1.4.	<i>Prueba piloto de escaneo POE de escaneo de cartílagos laríngeos</i>	52
5.8.3.2.	<i>Desarrollo y validación POE de medición de cartílagos laríngeos humanos</i>	52
5.8.3.2.1.	<i>Estandarización y pruebas de fiabilidad</i>	53
5.8.3.2.1.1.	<i>Pruebas de fiabilidad intraobservador</i>	54
5.8.3.2.1.2.	<i>Pruebas de fiabilidad interobservador</i>	54
5.8.3.2.2.	<i>Validación de instrumentos y procedimientos</i>	55
5.8.4.	<i>Fase III Obtención y organización de datos. Disección, escaneo y medición morfométrica en modelos reales y digitales</i>	56
5.8.4.1.	<i>Disección de especímenes laríngeos</i>	58
5.8.4.2.	<i>Escaneo de especímenes</i>	60
5.8.4.2.1.	<i>Postprocesamiento</i>	60
5.8.4.3.	<i>Medición de cartílagos laríngeos</i>	61
5.8.4.3.1.	<i>Medición directa de especímenes laríngeos</i>	61
5.8.4.3.2.	<i>Medición sobre modelos digitales</i>	62
5.8.4.4.	<i>Organización de datos</i>	63
5.8.5.	<i>Fase IV Impresión 3D y medición de modelos impresos en 3D</i>	63
5.8.5.1.	<i>Preparación de los archivos para impresión</i>	64
5.8.5.2.	<i>Configuración de parámetros de impresión (slicing)</i>	64
5.8.5.3.	<i>Impresión de modelos en resina</i>	65
5.8.5.4.	<i>Posprocesamiento de modelos impresos</i>	65
5.8.5.5.	<i>Medición sobre modelos impresos en 3D</i>	66
5.8.6.	<i>Fase V Análisis, correlación y validación de datos</i>	66
5.8.6.1.	<i>Organización y gestión de datos</i>	67
5.8.6.2.	<i>Análisis estadístico y cuantificación de distorsión</i>	67
5.8.7.	<i>Fase VI Organización y redacción del informe final</i>	69
6.	RESULTADOS	71
6.1.	<i>Caracterización de la morfometría de los cartílagos laríngeos mediante observación directa y digital</i>	71
6.1.1.	<i>Desarrollo y Validación de Protocolos Operativos Estandarizados (POE)</i>	71
6.1.2.	<i>Caracterización de la muestra y generación de modelos digitales</i>	77
6.1.2.1.	<i>Diseño y fabricación de soportes anatómicos para escaneo y preservación</i>	78
6.1.3.	<i>Impresión 3D precisa de cartílagos laríngeos en resina</i>	79
6.1.4.	<i>Banco de datos morfométricos</i>	80
6.2.	<i>Validación de los modelos 3D generados con técnicas digitales y de medición directa</i>	81
6.2.1.	<i>Análisis de diferencias entre métodos</i>	81
6.2.2.	<i>Cuantificación de la distorsión morfométrica por espécimen</i>	83
6.2.3.	<i>Síntesis comparativa de la distorsión entre cartílagos</i>	89
7.	DISCUSIÓN	92
7.1.	<i>Caracterización de la morfometría de los cartílagos laríngeos mediante observación directa y digital</i>	92
7.2.	<i>Obtención de modelos 3D cartílagos laríngeos humanos</i>	96
7.3.	<i>Validación de los modelos 3D generados con técnicas digitales y de medición directa</i>	98
8.	CONCLUSIONES	103

9. RECOMENDACIONES	105
10. CONFLICTO DE INTERESES	106
11. REFERENCIAS.....	107
12. ANEXOS.....	115
12.1. Anexo 1. POE de disección de cartílagos laríngeos.....	115
12.2. Anexo 2. POE de escaneo de cartílagos laríngeos.....	115
12.3. Anexo 3. POE de medición de cartílagos laríngeos	115
12.4. Anexo 4. Fichas técnicas	115
12.5. Anexo 5. Consideraciones éticas	115
12.6. Anexo 6. Informes técnicos	115
12.7. Anexo 7. Divulgación de conocimiento y convocatorias.....	115
12.8. Anexo 8. Modelos tridimensionales	115
12.9. Anexo 9. Cronograma y presupuesto	115
12.10. Anexo 10. Metodología	115
12.11. Anexo 11. Resultados.....	115

Índice de Imágenes

Imagen 1 Cadáver disponible en anfiteatro con espécimen de laringe anclada	44
Imagen 2 Estado de laringes disponibles en el anfiteatro de la universidad del Valle. A. laringe con lengua. B. laringe con corte posterior (no apta para el estudio). C. laringe con tráquea lengua, tiroides y tejido nervioso. D. laringe con tráquea con corte de epiglotis (no apta). E laringe con lengua con agente fungicida en tejido muscular. F. laringe con cartílagos fracturados (no apta). G. laringe con tráquea con cartílagos fracturados (no apta). H. laringe con lengua y cartílagos intactos con corte posterior (no apta)	45
Imagen 3 A. laringes donadas por medicina legal. B. laringe 1.M.14 con órgano lingual y graso extirpado . C. laringe 1.M.14 después de 12 horas sin conservación. D-E. laringes 1.M.14 y 2.M.50 conservadas a 4° centígrados	45
Imagen 4 Manipulación de especímenes laríngeos. A. Elaboración de soluciones para conservar especímenes. B Manipulación de especímenes. C. Conservación de especímenes laríngeos en Formal	46
Imagen 5 Espacio de disección y mesa de trabajo para disección. B. Kit de instrumental de disección básico utilizado	47
Imagen 6 Microscopio estereotáxico Meiji Techno 20-70x del laboratorio de histología de postgrado, visualizando cartílago epiglótico	48
Imagen 7 Imágenes obtenidas por microscopio estereotáxico. A. Laringe M.2.50 articulada. B. Cartílago tiroideo. C. Cartílago cricoides. D. Cartílago epiglótico. E. Cartílagos aritenoides.....	48
Imagen 8 Proceso de calibración del escáner EinScan Pro HD. A. Paso 1. B. Paso 2. C. Paso 3. D. Paso 4. E. Paso 5.....	50
Imagen 9 Disposición del escáner y guía de calibración en software EiScan	51
<i>Imagen 10 Soportes anatómicos para laringe articulada</i>	<i>51</i>
<i>Imagen 11 Soportes para cartílagos desarticulados A. Soporte para los cuatro cartílagos desarticulados. B. Soporte de cartílago tiroides que permite mantener el ancho del cartílago.....</i>	<i>51</i>
Imagen 12. Modelo tridimensional de espécimen 1.M.14	52
Imagen 13 Especimen 3.M.90 cartilagos articulados, evidenciando dificultad en identificación de landmarks	55
Imagen 14 Flujo de trabajo para la obtención de datos en la Fase III	57
<i>Imagen 15 Instrumentos de medición utilizados en la Fase III. (A) Pie de Rey digital Mitutoyo 500-197-30 (CD-8" ASX). (B) Software EXScan 4.2 para mediciones digitale</i>	<i>57</i>
Imagen 16 Medición directa sobre espécimen 1.M.14 con cartílagos articulados	62
Imagen 17 Medición directa sobre cartílago cricoides de espécimen 2.M.50.....	62
Imagen 18 Medción digital de cartílago tiroides 1.M.14 segmento c.SA.a.c (D) <-> c.SA.a.c (I).....	63
Imagen 19. Adecuación de soporte para impresión	64
Imagen 20. Cartílagos laríngeos impresos	65
Imagen 21 Postprocesamiento. A. limpieza con alcohol isopropílico. B Retiro de soportes con herramientas. C. Curado con Cuba AnnyCubic. D Modelos finales	66
Imagen 22 Especimen 4.F.17. A Laringe articulada. B. Cartílago cricoides. C Cartílago tiroides.....	71
Imagen 23 Especimen 5.M.xx presenta un foramen tiroideo en su lamina derecha	72

Imagen 24 Espécimen 6.M.xx presenta agenesia de asta superior izquierda.....	72
Imagen 25 Cámara para controlar la luz durante el escaneo	72
Imagen 26 Puntos landmarks de cartílago tiroides	75
Imagen 27 Promedio de medidas de Cartílago tiroides 1.M.14 y análisis de la desviación de dichas medidas	75
Imagen 28 Promedio de medidas de Cartílago tiroides 4.F.17 y análisis de la desviación de dichas medidas	75
Imagen 29 Puntos landmarks de cartílago cricoides.....	76
Imagen 30 Puntos landmarks de cartílago aritenoides.....	76
Imagen 31 Puntos landmarks de cartílago epiglótico	76
Imagen 32 Puntos landmarks de cartílagos articulados	76
Imagen 33 Cartílagos cricoides. Modelos impresos en resina de (fila inferior) vs especímenes cadavéricos. De izquierda a derecha: espécimen 1.M.14 - espécimen 2.M.50 - espécimen 3.M.90 – espécimen 4.F.17	80
Imagen 34 Estimaciones de los valores promedio y variabilidad para el cartílago tiroides por método	82
Imagen 35 Contrastes por parejas de los métodos de medición para el cartílago tiroides	82
Imagen 36 Estimaciones de los valores promedio y variabilidad para el cartílago cricoides por método.	83
Imagen 37 Contrastes por parejas de los métodos de medición para el cartílago cricoides.....	83
Imagen 38 Cartilago tiroides 1.M.14 Mediciones realizadas por 3 metodos; cadaverico, tridimensional y a modelo en resina.....	84
Imagen 39 Cartilago cricoides 1.M.14 Mediciones realizadas por 3 métodos; cadavérico, tridimensional y a modelo en resina	84
Imagen 40 Cartilago tiroides 2.M.50 Mediciones realizadas por 3 metodos; cadaverico, tridimensional y a modelo en resina.....	85
Imagen 41 Cartilago cricoides 2.M.50 Mediciones realizadas por 3 metodos; cadaverico, tridimensional y a modelo en resina	85
Imagen 42 Cartilago tiroides 3.M.90 Mediciones realizadas por 3 metodos; cadaverico, tridimensional y a modelo en resina.....	87
Imagen 43 Cartilago cricoides 3.M.90 Mediciones realizadas por 3 metodos; cadaverico, tridimensional y a modelo en resina	87
Imagen 44 Cartilago tiroides 4.F.17 Mediciones realizadas por 3 metodos; cadaverico, tridimensional y a modelo en resina.....	89
Imagen 45 Cartilago tiroides 4.F.17 Mediciones realizadas por 3 metodos; cadaverico, tridimensional y a modelo en resina.....	89

Índice de Tablas

Tabla 1. Anatomía y detalles morfométricos de los cartílagos laríngeos.....	23
Tabla 2 Variables consideradas para el análisis de los cartílagos laríngeos tiroides y cricoides. *Medida bilateral. **Medida interna y externa	37
Tabla 3. Inventario de laringes disponibles a utilizar en el proyecto	46
Tabla 4 Detalles técnicos para la obtención de modelos tridimensionales de cartílagos laríngeos	74
Tabla 5 Modelos 3D de especimen 4.F.17. A Laringe articulada. B Cartilago tiroideo C. Cartilago cricoides D. Cartilago epiglotico	77
Tabla 6 Pruebas de efectos fijos de (tipo III ^a) para el cartílago tiroides	81
Tabla 7 Pruebas de efectos fijos de (tipo III ^a) para el cartílago cricoides	82
Tabla 8 Distorsión morfométrica del cartílago tiroides (Especimen 1.M.14)	83
Tabla 9 Distorsión morfométrica del cartílago cricoides (Especimen 1.M.14)	84
Tabla 10 Distorsión morfométrica del cartílago tiroides (Especimen 2.M.50)	85
Tabla 11 Distorsión morfométrica del cartílago cricoides (Especimen 2.M.50)	86
Tabla 12 Distorsión morfométrica del cartílago tiroides (Especimen 3.M.90)	86
Tabla 13 Distorsión morfométrica del cartílago cricoides (Especimen 3.M.90)	87
Tabla 14 Distorsión morfométrica del cartílago tiroides (Especimen 4.F.17)	88
Tabla 15 Distorsión morfométrica del cartílago cricoides (Especimen 4.F.17)	88
Tabla 16 Resumen de distorsión del cartílago tiroides de todos los especímenes	90
Tabla 17 Resumen de distorsión del cartílago cricoides de todos los especímenes.....	91
Tabla 18. Trabajos realizados sobre morfometría laríngea *Otras mediciones.....	95
Tabla 19 Designación de diferentes puntos landmarks en los estudios morfométricos del cartílago tiroides. PL.c : centro de la prominencia laríngea. ITS.c : centro de incisura tiroidea superior. ITI.c : centro de incisura tiroidea inferior. CA : comisura anterior. AS.p : punta de la asta superior. AS.r : raíz de la asta superior. AI.r : raíz de la asta inferior. AI.p : punta de la asta inferior. BP.t.c : centro del borde posterior. TS.c : centro del tubérculo superior.....	100
Tabla 20 Designación de diferentes puntos landmarks en los estudios morfométricos del cartílago cricoides. AR.s : punto superior del arco. PC.p : punta del pico del cricoides. TC.c : centro de tubérculo cricoideo. CM.s : punta superior de la cresta mediana. CM.i : punta inferior de la cresta mediana. c.SA.a.c : Centro de superficie articular del aritenoides. c.SA.t.c : Centro de superficie articular del tiroides	101

Índice de Modelos 3D

A.	<i>Modelo 3D 13 Laringe articulada 4.F.17</i>	<i>77</i>
B.	<i>Modelo 3D 14 Cartílago tiroideo 4.F.17</i>	<i>77</i>
C.	<i>Modelo 3D 15 Cartílago cricoides 4.F.17</i>	<i>77</i>
D.	<i>Modelo 3D 16 Cartílago epiglótico 4.F.17</i>	<i>77</i>

Índice de Videos

Video 1 Camara control de luz.....	52
Video 2 Proceso de diseccion de laringe dejandola con cartilagos articulados	59

RESUMEN

El modelado y la impresión tridimensional (3D) han transformado el estudio anatómico al permitir la generación de réplicas precisas de estructuras biológicas, con aplicaciones relevantes en educación médica, investigación y planificación quirúrgica. En el caso de la laringe, la morfometría de sus cartílagos ha permitido describir variaciones asociadas al sexo, la edad y otras características individuales, lo que resalta la necesidad de contar con modelos anatómicos precisos que reflejen dichas variaciones y puedan ser aprovechados en diversos contextos. No obstante, en la región latinoamericana, la caracterización morfométrica de estos cartílagos ha sido limitada, lo que ha dificultado el desarrollo de modelos adaptados a la población local. Este estudio cuantitativo aplicado, con un enfoque descriptivo y aplicado, se configuró como una investigación no experimental de campo, orientada a la generación de protocolos replicables para la obtención de modelos anatómicos tridimensionales precisos; esto lo define también como una investigación de tipo metodológico o de desarrollo instrumental. El objetivo fue generar modelos tridimensionales anatómicamente precisos de los cartílagos laríngeos humanos, basados en análisis morfométrico. Se utilizaron cuatro especímenes de laringes humanas como objeto de análisis, centrándose en los cartílagos tiroideos y cricoides. La investigación se estructuró en seis fases metodológicas interrelacionadas: revisión del estado del arte, disección anatómica de los especímenes, escaneo con luz estructurada, procesamiento digital de los modelos, impresión 3D y análisis morfométrico comparativo.

Se realizaron mediciones tanto en los especímenes cadavéricos originales como en los modelos digitales tridimensionales y en los modelos impresos en 3D obtenidos. Los resultados evidenciaron que el proceso de modelado e impresión 3D de cartílagos laríngeos demostró una fidelidad morfológica global aceptable, especialmente en el cartílago cricoides, donde las distorsiones promedio fueron inferiores al 9 %. Asimismo, se identificaron diferencias morfométricas según el sexo biológico, particularmente en el cartílago tiroideo. Estos hallazgos validaron la utilidad del escaneo 3D como herramienta fiable para la obtención de modelos anatómicos precisos, con potencial aplicación en la docencia anatómica, la simulación quirúrgica y el diseño de dispositivos médicos personalizados. Este estudio representó un aporte innovador a la caracterización anatómica en el contexto local, al integrar tecnologías emergentes en el análisis de la morfología laríngea y proponer procedimientos replicables para futuras aplicaciones académicas y clínicas.

Abstract

Three-dimensional (3D) modeling and printing have transformed anatomical studies by enabling the generation of precise replicas of biological structures, with relevant applications in medical education, research, and surgical planning. In the case of the larynx, the morphometry of its cartilages has allowed for the description of variations associated with sex, age, and other individual characteristics, which highlights the need for precise anatomical models that reflect these variations and can be leveraged in various contexts. However, in the Latin American region, the morphometric characterization of these cartilages has been limited, hindering the development of models adapted to the local population. This quantitative, applied study, with a descriptive and applied approach, was configured as a non-experimental field investigation aimed at generating replicable protocols for obtaining accurate three-dimensional anatomical models; this also defines it as a methodological or instrumental development type of research. The objective was to generate anatomically precise 3D models of human laryngeal cartilages based on morphometric analysis. Four human larynx specimens were used as the object of analysis, focusing on the thyroid and cricoid cartilages. The research was structured into six interrelated methodological phases: a state-of-the-art review, anatomical dissection of the specimens, structured light scanning, digital processing of the models, 3D printing, and comparative morphometric analysis.

Measurements were taken on the original cadaveric specimens, the 3D digital models, and the 3D printed models obtained. The results showed that the process of 3D modeling and printing of laryngeal cartilages demonstrated an acceptable overall morphological fidelity, especially in the cricoid cartilage, where average distortions were less than 9%. Likewise, morphometric differences were identified according to biological sex, particularly in the thyroid cartilage. These findings validated the utility of 3D scanning as a reliable tool for obtaining precise anatomical models, with potential application in anatomical teaching, surgical simulation, and the design of personalized medical devices. This study represents an innovative contribution to anatomical characterization in the local context by integrating emerging technologies into the analysis of laryngeal morphology and proposing replicable procedures for future academic and clinical applications.

1. INTRODUCCIÓN

La laringe es un órgano impar y complejo, constituido por un armazón cartilaginoso articulado mediante ligamentos, membranas y músculos, lo que le confiere rangos específicos de movilidad. Internamente, se encuentra recubierta por una mucosa especializada. Esta estructura permite el paso de aire desde la faringe hacia la tráquea, participa en la protección de las vías respiratorias inferiores durante la deglución y cumple un papel fundamental en la emisión y articulación de sonidos en los seres humanos (1,2).

El armazón laríngeo está formado por cinco cartílagos principales: cartílago tiroides (impar), cartílago cricoides (impar), cartílago epiglótico (impar) y cartílagos aritenoides (pares). Además, incluye entre seis y ocho cartílagos accesorios, cuya presencia puede variar entre individuos. Estos son: cartílagos corniculados (pares), cartílagos cuneiformes (pares), cartílagos sesamoideos (anteriores o posteriores; pares) y cartílago interaritenoso (impar)(1,2). Esta complejidad estructural y funcional subraya la importancia de su estudio detallado. En este sentido, la morfometría y los avances tecnológicos de visualización tridimensional aportan herramientas valiosas para su caracterización y comprensión.

La morfometría, como una rama especializada de la morfología, se dedica al estudio cuantitativo y sistemático de las componentes de estructura y forma de las estructuras biológicas (3) y su análisis cuantitativo mediante técnicas biométricas y estadísticas para describir, comparar y entender las variaciones en la forma biológicas de los seres vivos (4,5)

Ofrece dos enfoques: el tradicional se basa en el análisis de distancias, ángulos y ratios, sin conservar toda la información espacial de los puntos de referencia y la morfometría moderna o geométrica, que utiliza técnicas geométricas, como las coordenadas cartesianas de puntos landmarks, que preservan toda la información espacial y permiten análisis estadísticos más completos y visualizaciones detalladas de la forma (3). Independiente de su enfoque, su objetivo es analizar la variación del tamaño y forma dentro de una población o entre diferentes grupos, así como investigar los factores que la determinan (genéticos, ambientales, patológicos, entre otros).

Tradicionalmente, la morfometría se ha aplicado en estudios anatómicos comparativos para establecer asociaciones poblacionales en estructuras como el cráneo, los dientes, las vértebras, la escápula, la pelvis, el húmero y el fémur (5). En el caso de la laringe, la morfometría ha permitido analizar y cuantificar variaciones de forma que influyen en su funcionalidad. El tamaño y la composición de la laringe parece contribuir a las propiedades acústicas específicas de la especie (6). Los primeros estudios sobre cartílagos laríngeos datan de la década de 1990, motivados por el interés en comprender condiciones clínicas como la estenosis subglótica y la estenosis posintubacional (7).

Hasta la fecha, la mayoría de los estudios morfométricos sobre la laringe se han enfocado en el cartílago tiroides (7–12). Aun así, la investigación en este campo ha demostrado que existen variaciones anatómicas asociadas a la edad (9), al sexo (11,13) e incluso a condiciones funcionales y patológicas como disfonías o luxaciones (14–16). Estas variaciones podrían ser capturadas y representadas mediante modelos tridimensionales con un alto grado de precisión anatómica. La fabricación aditiva o impresión 3D ha emergido en las últimas décadas como una técnica eficiente para la creación de objetos con geometrías complejas de forma costo-efectiva (17). En el ámbito biomédico, esta técnica se basa en la obtención de modelos digitales anatómicos a través de software de diseño asistido por computador (18), alimentado por datos

derivados de imágenes médicas (radiografía, tomografía computarizada, resonancia magnética, ultrasonido) o escaneos superficiales tridimensionales, como la fotogrametría, el escaneo con luz estructurada o el escaneo láser (19,20).

La integración de la morfometría y la fabricación aditiva no solo permite representar con fidelidad estructuras anatómicas, sino que también abre nuevas posibilidades para la enseñanza, la simulación clínica y el desarrollo de soluciones personalizadas en el campo de la salud. Esta convergencia tecnológica posibilita la creación de modelos laríngeos anatómicamente precisos, preservando detalles que suelen omitirse en otras técnicas de visualización tridimensional.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y SU JUSTIFICACIÓN

La laringe es una estructura anatómica compleja y multifuncional, esencial en diversos procesos vitales. Su estudio detallado resulta fundamental en contextos clínicos, quirúrgicos, educativos, forenses y de investigación biomédica. Una comprensión precisa de la estructura laríngea es crucial para la construcción de modelos que representen sus dimensiones de forma fiel, respondiendo a las necesidades de diferentes ámbitos profesionales (21). Sin embargo, existen diversas problemáticas que limitan su comprensión anatómica precisa, entre ellas: la escasa disponibilidad de especímenes laríngeos, la falta de modelos anatómicos que representen fielmente la morfología humana y la ausencia de protocolos estandarizados para la obtención, digitalización y fabricación de modelos anatómicos tridimensionales.

A nivel mundial, diversos países han desarrollado programas consolidados de donación de cuerpos, lo cual ha favorecido el acceso a especímenes cadavéricos para docencia e investigación, permitiendo la realización de disecciones y proyecciones. Estos métodos tradicionales del estudio general de la anatomía facilitan una visión y una comprensión espacial tridimensional del cuerpo humano, garantizando un conocimiento sólido de la anatomía para la práctica clínica (22). No obstante, esta realidad contrasta con la situación en América Latina, y particularmente en Colombia, donde aún persisten barreras culturales, éticas y logísticas para la donación y conservación de cuerpos humanos(22). Además, los cuerpos disponibles para prácticas anatómicas suelen deteriorarse con el uso progresivo, afectando su utilidad para investigaciones con criterios científicos estandarizados.

En respuesta a estas limitaciones, se han propuesto técnicas de plastinación y el desarrollo de modelos anatómicos como alternativas. Sin embargo, el proceso de plastinación implica un tiempo de producción prolongado y costos elevados, además tales modelos no siempre logran una representación fiel de las estructuras anatómicas (22). Por otro lado, se reporta que los modelos anatómicos disponibles presentan deficiencias importantes: no reproducen con precisión la forma, proporciones ni texturas de los tejidos laríngeos reales, ni están diseñados a partir de datos morfométricos locales (22). Esta carencia, que puede ser corregida, compromete su aplicabilidad tanto en la enseñanza como en la planificación clínica a nivel local.

Las técnicas de medición endoscópica, radiológica y cadavérica son las herramientas de evaluación morfológica más utilizadas para las estructuras laríngeas. Dado que no se ha establecido un método estándar para las mediciones, han surgido diferencias significativas entre los hallazgos reportados. Por lo tanto, se necesitan más estudios y mediciones para una comprensión más profunda de la anatomía laríngea (8).

En el ámbito internacional, el desarrollo de tecnologías digitales, como el escaneo tridimensional y la fabricación aditiva, ha abierto nuevas posibilidades para la generación de modelos

anatómicos más precisos y personalizados. Sin embargo, su eficacia depende en gran medida de la estandarización de procesos, desde la disección y digitalización hasta el modelado y la validación de los productos finales. Particularmente en el caso de los cartílagos laríngeos, persisten interrogantes sobre qué método ofrece una mayor fidelidad anatómica: la medición directa mediante instrumentos manuales o el escaneo 3D asistido por software. A su vez, son escasos los estudios comparativos que evalúan la precisión, reproducibilidad y aplicabilidad de ambas metodologías en entornos educativos o clínicos.

La ausencia de protocolos específicos y validados para la obtención y reproducción de estructuras laríngeas limita el desarrollo de modelos anatómicos confiables. Esto impacta negativamente en la formación de profesionales de la salud y en la planificación de intervenciones terapéuticas o quirúrgicas de alta complejidad, como los trasplantes laríngeos, cricotomías, intubaciones, colocación de stents o tratamientos para las disfonías. Además, los modelos impresos en 3D podrían desempeñar un papel clave en la rehabilitación vocal, el diseño de dispositivos biomédicos y la enseñanza especializada en disciplinas como la Música, la Antropología o la Fonoaudiología. La fabricación aditiva ha revolucionado la forma de concebir y enseñar la Anatomía humana. Frente a las limitaciones de las imágenes bidimensionales tradicionales, los modelos tridimensionales y los impresos en 3D ofrecen una alternativa que mejora significativamente la comprensión espacial de estructuras complejas como la laringe. Esta convergencia entre ciencias de la salud y tecnologías digitales no solo fortalece la docencia, sino que abre nuevas posibilidades de innovación biomédica.

Además de su valor pedagógico, la implementación de la fabricación aditiva en la creación de modelos anatómicos representa una alternativa costo-efectiva frente a la creciente escasez de especímenes cadavéricos y las limitaciones de los modelos plastinados, ofreciendo la posibilidad de replicar estructuras a demanda y con alta fidelidad. Este abordaje requiere un enfoque marcadamente interdisciplinario, congregando el conocimiento de anatomistas, ingenieros biomédicos, radiólogos y clínicos, lo que enriquece la perspectiva y las soluciones desarrolladas. Por tanto, este trabajo se justifica por su significativa contribución a la caracterización cuantitativa y tridimensional de los cartílagos laríngeos humanos, específicamente en una población de América del Sur que ha sido escasamente estudiada (9). Esta caracterización no solo aporta datos morfométricos normativos esenciales para la comprensión de la variabilidad anatómica regional, sino que también es crucial para la planificación quirúrgica personalizada, el diseño y desarrollo de dispositivos biomédicos a medida, y la mejora de los métodos de diagnóstico y tratamiento de patologías laríngeas. La metodología propuesta, basada en escaneo 3D, análisis morfométrico y fabricación aditiva, no solo generará modelos anatómicos precisos y contextualizados, sino que, al buscar la estandarización y validación de un protocolo reproducible, sentará las bases para el desarrollo confiable de modelos anatómicos de otras estructuras complejas del cuerpo humano. Su impacto se extiende al ámbito educativo, al facilitar una comprensión espacial superior de la laringe, y al clínico, al ofrecer herramientas avanzadas para la simulación y la práctica. De esta manera, el estudio no solo aborda una laguna de conocimiento, sino que también ofrece soluciones prácticas y escalables para la investigación, la docencia y la atención en salud.

Considerando lo anterior, la pregunta de investigación que guía este estudio es:

¿Cuál es el proceso para modelar tridimensionalmente cartílagos laríngeos humanos a partir de análisis morfométrico?

3. REFERENTE TEÓRICO

El propósito de este referente teórico es contextualizar al lector en los principales conceptos, antecedentes y herramientas metodológicas que sustentan el estudio sobre la caracterización y modelado tridimensional de los cartílagos laríngeos humanos.

El estudio de la anatomía ha experimentado una evolución significativa impulsada por los avances en las tecnologías de imagen y modelado tridimensional. Esta transformación ha permitido la transición de métodos tradicionales hacia enfoques más precisos, interactivos y reproducibles. En este contexto, la incorporación de tecnologías de escaneo y modelado 3D se presenta como una oportunidad clave para superar las limitaciones de los enfoques tradicionales y mejorar la precisión y reproducibilidad de los estudios anatómicos y morfométricos.

Este apartado se estructura en dos secciones principales: 1. antecedentes, que explora el uso de tecnologías en la creación de modelos anatómicos, y 2. marco conceptual, que profundiza en las categorías centrales del estudio: la laringe, la morfometría, la morfometría laríngea, las tecnologías de escaneo 3D, el modelado e impresión 3D en anatomía (con un enfoque específico en la laringe) y los protocolos operativos estandarizados.

3.1. ANTECEDENTES

El estudio anatómico de la laringe se remonta a civilizaciones antiguas, como la egipcia, hindú y griega (alrededor del 3600 a. C.), donde ya se representaban estructuras laríngeas en ilustraciones que permitieron procedimientos rudimentarios como la traqueostomía (23). Durante el Renacimiento, figuras como Leonardo da Vinci y Miguel Ángel profundizaron en el conocimiento anatómico mediante disecciones humanas, contribuyendo al desarrollo de intervenciones quirúrgicas más complejas y herramientas como el laringoscopio. Este avance marcó el tránsito desde una anatomía meramente descriptiva hacia una anatomía funcional y aplicada (23). En la actualidad, el estudio anatómico de la laringe se ha potenciado con el uso de tecnologías como la imagenología, el modelado tridimensional y la cirugía mínimamente invasiva.

A lo largo de la historia de la anatomía, una problemática persistente ha sido la variabilidad terminológica. Los primeros tratados anatómicos se escribieron en griego antiguo; posteriormente, hasta el siglo XIX, se redactaron en latín, lo que generó un uso inconsistente de términos anatómicos y la necesidad de estandarización (24). La etimología de estos términos no solo facilita su comprensión, sino que también actúa como un recurso pedagógico fundamental en la enseñanza de la anatomía (24). Esta evolución en la descripción y entendimiento de las estructuras ha sido constante, abriendo camino a enfoques más cuantitativos y precisos.

En este contexto de búsqueda de mayor precisión, la construcción de modelos anatómicos tridimensionales ha cobrado una relevancia creciente en las últimas décadas, especialmente en los campos de la docencia, la investigación, la planificación quirúrgica y la simulación. Estos modelos permiten una visualización más precisa de estructuras complejas, facilitando el aprendizaje anatómico y el desarrollo de habilidades clínicas. Entre las tecnologías utilizadas para su fabricación se incluyen la tomografía computarizada (TC), la resonancia magnética (RM) y el escaneo 3D mediante luz estructurada o láser. En diversas áreas de la anatomía, los modelos

3D se han empleado para representar órganos como el cerebro, el corazón, los vasos principales, la pelvis y, más recientemente, la laringe (17,20). Gracias al uso de materiales como resinas fotosensibles, plásticos biodegradables y compuestos de silicona, es posible obtener modelos de alta fidelidad tanto morfológica como funcional.

Sin embargo, una revisión de la literatura indica que, a pesar de su crucial función, la mayoría de estos modelos se han centrado predominantemente en estructuras óseas o en sistemas de alta relevancia quirúrgica inmediata, como el sistema cardiovascular o el esqueleto (20), dejando en segundo plano estructuras cartilaginosas complejas como los cartílagos laríngeos. Esta disparidad refleja un sesgo investigativo hacia las estructuras más prominentes o clínicamente relevantes, siendo el cartílago tiroides el que ha recibido la mayor atención en la investigación, dejando relativamente inexplorados otros cartílagos menores y sus posibles variaciones morfométricas.

La aplicación de modelos tridimensionales con fines educativos y de simulación quirúrgica ha demostrado ser una herramienta prometedora. Estos modelos permiten a los residentes estudiar la anatomía y perfeccionar sus habilidades técnicas para procedimientos complejos (25). Históricamente, los modelos de simulación han incluido especímenes cadavéricos o animales; aunque estos últimos pueden ser más económicos, los modelos humanos son de difícil acceso y presentan desafíos de conservación. En contraste, los modelos impresos en 3D no requieren refrigeración y pueden adaptarse a escenarios quirúrgicos específicos (25). En el contexto de procedimientos como la laringoplastia, si bien los intentos tempranos de simulación usaron materiales rudimentarios como tubos de papel higiénico, cartón y tela, estos esfuerzos resaltaron la necesidad de modelos tangibles para la práctica. Asimismo, el desarrollo de modelos para situaciones como las emergencias pediátricas inusuales, donde la experiencia es fundamental, ha demostrado que el uso de estos modelos aumenta la confianza y el nivel de habilidad de los profesionales (25).

La presente investigación busca superar las limitaciones de los modelos tempranos y la escasez de estudios morfométricos detallados de los cartílagos laríngeos, especialmente en la población latinoamericana. Esto se logrará mediante la aplicación de tecnologías avanzadas de escaneo e impresión 3D para generar modelos de alta fidelidad anatómica basados en datos morfométricos precisos.

3.2. MARCO CONCEPTUAL

3.2.1. LARINGE

La laringe es un órgano impar, anatómicamente complejo, ubicado en la región anterior del cuello, entre la mandíbula y el tórax. Considerada una cavidad aérea ondulada e insertada entre la orofaringe y la tráquea, se relaciona posteriormente con la hipofaringe (26–28). Esta estructura se caracteriza por estar formada por un esqueleto cartilaginoso sostenido por ligamentos y músculos, los cuales la conectan entre sí y con estructuras adyacentes como el hueso hioides, la base del cráneo y la tráquea (27). Internamente, se encuentra recubierta por una mucosa especializada que presenta una organización ondulada de pliegues sobre su armazón cartilaginoso (27).

Se sitúa en la encrucijada aerodigestiva y cumple funciones esenciales en la protección de las vías respiratorias inferiores, el control del paso del aire hacia la tráquea y la producción de la voz

(26,27). Funcionalmente, actúa como una válvula reguladora del tracto aerodigestivo superior, dirigiendo el aire y los alimentos hacia sus respectivas vías (27).

Durante la deglución, la epiglotis, compuesta por cartílago rico en fibras elásticas, cumple un papel crucial al prevenir el ingreso del bolo alimenticio a la vía aérea. Este proceso involucra un reflejo involuntario en el cual la epiglotis primero se desplaza hacia una posición horizontal por acción del ligamento hioepiglótico, y luego se pliega completamente hacia abajo, cerrando la abertura laríngea en coordinación con el desplazamiento del hioides (29). Este cartílago se encuentra anclado mediante ligamentos como el hioepiglótico, tirohioideo y tiroepiglótico, localizados en el espacio preepiglótico y en conexión con la raíz de la lengua por medio de la membrana hioepiglótica (29). Alteraciones en esta secuencia pueden generar disfagia por aspiración (29).

En la fonación, los sonidos se producen por la vibración de los pliegues vocales cuando el aire pasa entre ellos, generando distintos tonos según la tensión y posición de estos (27). La laringe se eleva para producir tonos agudos y desciende para tonos graves. El volumen laríngeo influye directamente en la tonalidad vocal: una laringe más grande, como la de los hombres, tiende a generar sonidos más graves; mientras que una más pequeña, como en mujeres y niños, se asocia con tonos más agudos. Este volumen aumenta progresivamente hasta la pubertad, etapa en la cual la laringe adquiere sus características acústico-perceptuales definitivas (1,2,30).

Su posición varía según la edad y el sexo: en adultos, se extiende desde el borde superior del cartílago tiroides (aproximadamente a nivel de la vértebra C3) hasta el borde inferior del cartílago cricoides (a nivel de C6), mientras que en niños y mujeres se sitúa más superiormente, comenzando desde C1 y presentando una epiglotis proporcionalmente más ancha (27,31).

Desde el punto de vista anatómico, el armazón laríngeo está compuesto por cinco cartílagos principales: el tiroides, cricoides y epiglótico (impares), y los aritenoides (pares), además de cartílagos accesorios cuya presencia varía entre individuos, como los cartílagos corniculados (de Santorini), cuneiformes (de Wrisberg), sesamoideos (anteriores o posteriores) y el cartílago interaritenideo (1,2,26,27). En la tabla 1 se presentan las características morfométricas de los cartílagos objeto de estudio de este trabajo (cartílago tiroides y cricoides) y su ampliación se presenta en el anexo 3. Se sigue los lineamientos de la nomenclatura propuesta por la Federative International Programme for Anatomical Terminology (FIPAT) y su correspondiente traducción al español (28,32)

Cartilago tiroides (<i>Thyroid cartilage</i>) (impar) (principal)
Forma y características
El más grande de la laringe y de naturaleza hialina, debe su nombre a su forma similar a un escudo (del griego <i>thureoeides</i>). Actúa como un soporte estructural robusto para los componentes móviles laríngeos. Se conecta superiormente con el hueso hioides e inferiormente recubre al cartílago cricoides (2,21,26,27,33) Está compuesto por dos láminas cuadriláteras (alas) (<i>Lamina of thyroid cartilage</i>) que se fusionan anteriormente en sus dos tercios inferiores, formando un ángulo diedro abierto posteriormente. En el tercio superior, esta unión incompleta genera una incisura superior (<i>Superior thyroid notch</i>) en forma de "V". El vértice de esta incisura marca el punto más anterior del cartílago y de la laringe. La prominencia laríngea (<i>Laryngeal prominence</i>) (nuez de Adán), palpable subcutáneamente, se origina en la unión anterior de los bordes superiores de estas láminas. (21,27,28,34)

De su borde posterior se proyectan cuatro astas (*horns of thyroid cartilage*) (dos superiores y dos inferiores) (21,26–28). Las astas superiores, más largas, se dirigen hacia arriba y posteriormente para articularse con el hueso hioides mediante los ligamentos tirohioideos laterales. Las astas inferiores, más cortas, se proyectan hacia abajo y medialmente para articularse con el cartílago cricoides en la articulación cricotiroides, crucial para modular la tensión y longitud de las cuerdas vocales (27).

La comisura anterior, ubicada en la parte frontal de la glotis, es el punto donde convergen los extremos anteriores de los pliegues vocales derecho e izquierdo. Representa una inserción fundamental de las cuerdas vocales en el cartílago tiroideos, con relevancia funcional en la fonación y en la evaluación de patologías laríngeas (35).

En cada lámina tiroidea se distinguen las siguientes estructuras (2)

Cara anterolateral: Presenta la cresta oblicua, con dirección inferior, anterior y medial, para la inserción de los músculos esternotiroides (posteroinferior) y tirohioideo (anterosuperior).

Cara posteromedial: Superficie lisa que contribuye a la protección de la laringe y los recesos piriformes de la faringe.

Borde superior: Define la incisura tiroidea superior y sirve de inserción a la membrana tirohioidea.

Borde inferior: Presenta la escotadura tiroidea inferior.

Borde posterior: Se extiende verticalmente hacia el asta superior y el asta inferior, la cual posee una superficie articular para el cricoides orientada posteromedialmente.

Detalles morfométricos

Las dimensiones del cartílago tiroideos son significativamente mayores en hombres que en mujeres. El ángulo interlaminar (ILA), formado en la prominencia laríngea, tiende a ser más agudo y con una proyección más anterior en hombres. Esta característica, junto con otras, explica la mayor prominencia laríngea (nuez de Adán) típicamente observada en el sexo masculino (11,27,30). La cresta medial tiene una longitud aproximada de 20 ± 3.5 mm (21)

La longitud de las astas es variable, existiendo controversia sobre si las astas superiores son más largas en hombres o en mujeres (11,26).

El cartílago tiroideos experimenta una osificación progresiva a lo largo de la vida, comenzando en la pubertad (26). Durante esta etapa, la testosterona induce un agrandamiento significativo de la laringe, particularmente del cartílago tiroideos, duplicando casi su diámetro anteroposterior. La influencia de la testosterona también resulta en un ángulo de fusión anterior de las láminas más agudo (alrededor de 90°) en comparación con la laringe femenina o con menor influencia androgénica, donde el ángulo es más obtuso (cercano a 120°) (34).

En el cartílago tiroideo fetal, las dos láminas son simétricas y carecen de los tubérculos tiroideos superiores e inferiores y de la línea arqueada presentes en adultos (36). El ángulo interlaminar es obtuso y redondeado, independientemente del sexo. Las astas superior e inferior son visibles, siendo las superiores ligeramente más largas y presentando diversas orientaciones. La incisura tiroidea superior es evidente, aunque más superficial y redondeada que en el adulto, mientras que la incisura inferior no se manifiesta hasta después de la vigésima semana de gestación. En fetos masculinos, se observa una ligera diferencia de 0.2 mm en la longitud de las láminas, siendo la derecha más larga. Adicionalmente, en algunos casos se puede observar un foramen tiroideo, generalmente unilateral (36).

Cartílago cricoides (*Cricoid cartilage*)

(impar)
(principal)

Forma y características

El segundo más grande de la laringe y de naturaleza hialina, recibe su nombre de su forma anular (*krikoeides* en griego, que significa "en forma de anillo"). Es el único cartílago de las vías respiratorias que constituye un anillo completo, ubicándose inferior al cartílago tiroideos y abarcando la región subglótica (27) (37).

El arco (*arch of cricoid cartilage*), la porción anterior más estrecha y anterolateral, exhibe un tubérculo cricoideo medial y un pico cricoideo (27).

La lámina (*lamina of cricoid cartilage*), la porción posterior del anillo es más alta y se proyecta superiormente, alcanzando en su parte superior el nivel de los pliegues vocales. En los márgenes superiores y laterales de la lámina se encuentran dos facetas articulares (*arytenoid articular surface*) para su unión con los cartílagos aritenoides, formando las articulaciones cricoaritenoides (27).

Adicionalmente, en las caras laterales e inferior de la lámina posterior existen facetas articulares pares (*Thyroid articular surface*)(27) que se articulan con las astas inferiores del cartílago tiroides, conformando las articulaciones cricotiroides. La cara posterior de la lámina está dividida verticalmente por una cresta mediana roma, que delimita dos superficies laterales deprimidas donde se insertan los músculos cricoaritenoides posteriores.

El borde inferior del cartílago cricoides es irregular y generalmente se une lateralmente al primer anillo traqueal. El borde superior se une anteriormente a la membrana cricotiroidea y lateralmente a ambos lados al músculo cricoaritenideo lateral.

Detalles morfométricos

El cartílago cricoides presenta dimensiones y características métricas que varían según la edad y el sexo. En adultos, se ha observado consistentemente que los diámetros anteroposterior y transversal, así como las alturas del arco anterior y la lámina posterior, son mayores en hombres que en mujeres (38,39). Si bien el grosor del arco y la lámina puede mostrar variaciones individuales, algunos estudios no reportan diferencias significativas por sexo en este parámetro. El peso total del cartílago cricoides también tiende a ser superior en individuos masculinos (39).

La forma del cartílago cricoides puede presentar variaciones (ovoide, oval, en forma de pera), cuya distribución puede diferir entre poblaciones. Los ángulos formados por las facetas articulares cricoaritenoides, relevantes para la biomecánica laríngea, han sido objeto de mediciones específicas. Asimismo, se han cuantificado distancias importantes como la separación entre las facetas articulares aritenoides y la ubicación de las facetas tiroideas respecto al borde inferior del cartílago.

Con el envejecimiento, se han descrito cambios en las dimensiones del cartílago cricoides, incluyendo una posible disminución de ciertos diámetros. La osificación progresiva es un fenómeno bien documentado en este cartílago con el avance de la edad. Se han evidenciado variaciones morfométricas entre diferentes grupos étnicos y poblaciones geográficas.

En el período fetal, el cartílago cricoides muestra un anillo elíptico y una lámina lisa. Un hallazgo significativo es la diferencia en el ancho de la lámina entre sexos, siendo consistentemente mayor en fetos masculinos. Se han establecido correlaciones lineales entre las dimensiones del cartílago cricoides y parámetros del desarrollo fetal como la longitud vértice-cóccix y la edad gestacional, lo que permite comprender la ontogenia laríngea (36).

Tabla 1. Anatomía y detalles morfométricos de los cartílagos laríngeos

En el desarrollo humano, los cartílagos laríngeos son estructuras inicialmente avasculares que se osifican tempranamente, en particular en las zonas de inserción muscular. Este proceso está estrechamente relacionado con el desarrollo de su vascularización, sin mostrar diferencias significativas entre sexos. En sus primeras fases, estos cartílagos actúan como barreras frente a la diseminación de tumores laríngeos; sin embargo, una vez vascularizados, pueden facilitar su propagación (1).

La laringe se encuentra rodeada de estructuras anatómicas relevantes: la glándula tiroides, ubicada en los aspectos anterior y lateral de la laringe inferior y la tráquea, está unida a la laringe mediante la fascia pretraqueal; los espacios carotídeos se localizan en posición posterolateral respecto a la laringe; y los músculos infrahioideos, situados anterolateralmente, se extienden sobre la glándula tiroides (27).

Cartílagos, músculos y ligamentos laríngeos conforman el marco estructural sobre el que se asienta la mucosa, dando lugar a pliegues, espacios aéreos y compartimentos submucosos. Esta mucosa está recubierta en su mayoría por epitelio cilíndrico ciliado pseudoestratificado con células caliciformes, como en la tráquea. No obstante, las regiones que se yuxtaponen con otras superficies durante la fonación y la deglución, como las cuerdas vocales, los bordes de los pliegues ariepiglóticos, partes de la epiglotis y las fosas piriformes, presentan epitelio escamoso estratificado no queratinizado, cuya distribución puede variar entre individuos. Adicionalmente, existen glándulas subepiteliales secretoras de moco, más concentradas en la subglotis, la

aurícula izquierda, los sáculos ventriculares, las cuerdas vocales falsas y la región aritenoidea (27).

Desde el punto de vista neuroanatómico, el nervio laríngeo interno, rama del nervio laríngeo superior, penetra la membrana tirohioidea por su mitad posterior, por encima de la arteria y vena laríngeas superiores y del margen superior del cartílago tiroides. Esta región requiere especial precaución, ya que las ramas del nervio confieren sensibilidad a las estructuras supraglóticas. La rama externa del nervio laríngeo superior desciende por el borde posterior del cartílago tiroides, protegida por el músculo tirohioideo, mientras que el nervio laríngeo recurrente accede a la laringe por debajo del margen posteroinferior del músculo cricotiroides (34).

La intrincada anatomía y multifuncionalidad de la laringe, junto con su variabilidad individual, subrayan la importancia de métodos precisos para su caracterización y estudio detallado, como la morfometría y el modelado tridimensional.

3.2.2. MORFOMETRÍA

La morfometría es una rama de la morfología que se enfoca en la cuantificación y analizar las diferencias en las dimensiones y la estructura de las formas biológicas. Su aplicación integra conceptos de geometría y estadística para estudiar los cambios asociados al crecimiento y desarrollo corporal, así como las variaciones influenciadas por factores genéticos, contextuales y ambientales (3). Facilita el estudio detallado y comparativo de las formas, independientemente del tamaño, la posición o la orientación, lo que aporta una comprensión más profunda y dinámica de la morfología en diversas disciplinas científicas (4).

El término "morfometría" fue introducido por primera vez por Robert E. Blackith en 1957, en el contexto de sus investigaciones sobre langostas con fines agrícolas. Blackith aplicó métodos estadísticos multivariados al análisis de la morfología del caparazón de estos insectos, logrando identificar transformaciones morfológicas relacionadas con el comportamiento poblacional. Su trabajo pionero sentó las bases para la incorporación de modelos biológicos precisos en el análisis estadístico morfológico (3).

Tradicionalmente, la morfometría se ha centrado en la medición directa de parámetros lineales y angulares, como longitudes, anchos, perímetros, áreas, ángulos y radios de estructuras anatómicas entre puntos de correspondencia en cada objeto que coincide entre poblaciones o dentro de ellas (3) y en el análisis estadístico univariado o multivariado de estas variables (4,5). Este enfoque, conocido como morfometría tradicional, permite describir cuantitativamente la forma y el tamaño a partir de un conjunto de variables métricas (3). Aunque su simplicidad facilita la recolección, cuantificación y el análisis de datos que representa una estructura, su principal limitación radica en que no preserva la información espacial completa de la estructura, ya que cada medida se analiza de forma relativamente independiente (3,4). Esto puede dificultar la interpretación de variaciones complejas en la morfología general y la visualización de la forma de manera integral de la forma.

No obstante, la morfometría tradicional sigue siendo ampliamente utilizada en contextos donde se requiere una caracterización cuantitativa directa de estructuras anatómicas, especialmente cuando el interés se centra en parámetros específicos fácilmente medibles (3). En el ámbito clínico y anatómico, este podría demostrar ser útil para establecer patrones de crecimiento, identificar alteraciones estructurales y comparar poblaciones, siempre que se apliquen criterios rigurosos de estandarización en la toma de medidas.

En contraposición, la morfometría geométrica representa una evolución metodológica al enfocarse en la configuración espacial de un conjunto de puntos anatómicos homólogos o landmarks entre individuos, utiliza métodos geométricos, como las coordenadas cartesianas de puntos de referencia (landmarks o hitos) y contornos, permitiendo analizar la forma en un espacio geométrico que preserva relaciones espaciales y proporciona más información sobre la estructura morfológica (3). A través del análisis estadístico multivariado de coordenadas, este enfoque permite identificar, tanto cuantitativa como visualmente, qué regiones de una estructura están siendo modificadas y de qué manera. La morfometría geométrica elimina el efecto del tamaño, la orientación y la posición mediante procedimientos como la superposición de Procrustes, conservando y analizando únicamente la forma pura (shape) (3,4).

Una distinción clave entre la morfometría tradicional y la moderna es que la morfometría tradicional se basa en el análisis de distancias, ángulos y ratios, sin conservar toda la información espacial de los puntos de referencia, lo que limita la capacidad de recuperar la forma original y realizar representaciones visuales precisas. En cambio, la morfometría moderna utiliza técnicas geométricas, como las coordenadas cartesianas de puntos landmarks, que preservan toda la información espacial y permiten análisis estadísticos más completos y visualizaciones detalladas de la forma (3). Sin embargo, la selección de uno u otro enfoque dependerá de los objetivos específicos del estudio y de la disponibilidad de herramientas y datos para su implementación.

3.2.3. MORFOMETRÍA LARÍNGEA

La morfometría aplicada al estudio de las estructuras laríngicas permite caracterizar cuantitativamente las variaciones en forma, tamaño y proporciones presentes entre individuos de distintos sexos, edades o grupos poblacionales.

La morfometría laríngea es fundamental porque proporciona una base anatómica precisa que facilita el diagnóstico y tratamiento de patologías laríngicas, optimiza procedimientos clínicos como la intubación, el uso de stents y las intervenciones endoscópicas, y permite una mejor planificación de cirugías laríngicas (7). Además, es clave para interpretar adecuadamente estudios de imagen como la tomografía y la resonancia magnética, y para la colocación precisa de electrodos en estudios electrofisiológicos (42). El conocimiento morfométrico preciso también resulta útil en contextos no clínicos, como el entrenamiento vocal profesional, y en el manejo de condiciones como la estenosis subglótica y post-intubación(21). La caracterización anatómica mediante disecciones es complementaria para comprender las imágenes obtenidas.

La morfología de los cartílagos laríngicos desempeña un papel crucial en los mecanismos de apertura y cierre de la glotis, así como en la modulación de la tensión de las cuerdas vocales (43). Sin embargo, el análisis morfométrico de la laringe presenta retos debido a su compleja estructura tridimensional y la escasez de puntos anatómicos claramente definidos (43).

Los estudios morfométricos laríngicos en humanos han tenido como objetivos principales describir las variaciones clínicamente relevantes en estructuras cartilaginosas entre diferentes grupos etarios y de género (8), así como establecer diferencias estructurales entre la laringe de niños y adultos (44). Es fundamental comprender las diferencias anatómicas entre diferentes etnias, géneros y grupos de edad para que los profesionales modifiquen detalles de sus procedimientos (45).

La morfología laríngea es muy variable entre los pacientes, incluso en la misma población o sexo (43). La literatura reporta que la laringe puede madurar, crecer y moverse de una manera

diferente dependiendo del género (influencia hormonal), la edad y la raza (8). La estructura anatómica, así como la longitud y el tamaño morfométrico de cada órgano y estructura, difieren según la raza o la etnia (46).

Uno de los intereses más recurrentes en la morfometría laríngea ha sido identificar el dimorfismo sexual (9). Específicamente, en poblaciones adultas, las medidas de longitud suelen ser mayores en el sexo masculino, mientras que las medidas de ángulos son predominantemente mayores en el sexo femenino (8,11). Sin embargo, estudios han demostrado que no se observa dimorfismo sexual en los cartílagos laríngeos durante la infancia y que la diferenciación sexual comienza en la adolescencia debido a factores hormonales (47). Asimismo dichos datos anatómicos precisos contribuirían a la construcción de modelos aplicables en contextos clínicos o educativos.

Algunas investigaciones se han centrado en describir con detalle medidas anatómicas específicas en determinadas poblaciones. Estos estudios abarcan diversas regiones geográficas, incluyendo trabajos realizados en India (7,21,38,48–57), Turquía (8,45,47,58–64), Estados Unidos (65–68), Alemania (40,69–71), Brasil (9,72,73), Rusia (74–76), Polonia (44,77), Korea (46,78), Francia (26,79), Israel (80,81), Japón (10,13), Nigeria (82), Suecia (39), Croacia (11), Irán (83), Colombia (16), Egipto (42), Líbano (84), Bangladés (85), Nepal (86) y España (87). Estos trabajos, además de aportar información local, han permitido comparar los hallazgos con los de otras poblaciones, identificando similitudes y diferencias en la morfología laríngea entre distintos grupos étnicos (11). En otros casos, la morfometría laríngea ha permitido explorar relaciones entre medidas anatómicas y variables antropológicas como el sexo (9,11) o la estatura (47). En este contexto, varios estudios han centrado su objetivo principal en la discriminación sexual a partir de mediciones laríngeas, mientras que la estatura se considera un objetivo secundario pero relevante (47).

Diversos estudios han abordado la morfometría laríngea utilizando distintos métodos (64) y poblaciones, lo que ha generado una notable variabilidad en los resultados reportados, reduciendo así la fiabilidad de los datos (69). Esta heterogeneidad puede atribuirse a factores como las diferencias en las técnicas de medición (uso de imágenes, disección en cadáveres frescos o conservados), el tamaño y la composición de las muestras, así como las características étnicas (59), talla (61), etarias y sexuales de las poblaciones estudiadas. La mayoría de las investigaciones disponibles se han realizado en poblaciones occidentales, lo cual limita la generalización de sus hallazgos a otros grupos poblacionales. Esta variabilidad metodológica y demográfica resalta la necesidad de estudios específicos en diferentes contextos geográficos y culturales, que contribuyan a consolidar datos morfométricos representativos y aplicables en el ámbito clínico y quirúrgico.

La comparación de estos resultados con otros estudios revela que la morfología del cartílago cricoides difiere entre las poblaciones, y es posible que esto se deba a diferencias en la forma y la raza del cuerpo (49). La gran diferencia en casi todos los tamaños y formas del cartílago cricoides dificulta la estandarización de los stents rígidos utilizados en estos órganos. Por lo tanto, se deben usar tubos endotraqueales de tamaño apropiado para la intubación. El conocimiento de tales mediciones y variaciones es de fundamental importancia para la práctica clínica con el fin de prevenir lesiones innecesarias en la laringe (49).

Establecer las medidas morfométricas de la laringe desde la etapa fetal hasta la adultez es crucial para comprender el desarrollo anatómico y funcional de esta estructura a lo largo de la vida. Esta

información es particularmente importante en contextos clínicos como la intubación, ya que las dimensiones inadecuadas de los dispositivos, especialmente en recién nacidos y prematuros, pueden provocar lesiones laríngeas graves como la estenosis. A diferencia de los adultos, donde existen múltiples estudios detallados, los datos morfométricos en fetos y neonatos son limitados, lo que resalta la necesidad de investigaciones más específicas que permitan optimizar el manejo de las vías respiratorias en poblaciones pediátricas vulnerables y prevenir complicaciones asociadas a procedimientos (59).

En el ámbito forense, el cartílago tiroideo representa una estructura de gran utilidad para determinar el sexo, especialmente cuando otros elementos esqueléticos comúnmente empleados, como la pelvis o el cráneo, no se encuentran disponibles debido a daños, fragmentación o deterioro post-mortem. Este cartílago, que constituye la mayor parte de la laringe, tiende a conservarse mejor que otros tejidos y puede mantener su integridad incluso en condiciones desfavorables. Su morfología muestra diferencias entre hombres y mujeres, lo que lo convierte en una alternativa valiosa para apoyar la identificación de restos humanos. Asimismo, se ha observado que sus características morfométricas pueden variar entre diferentes poblaciones, por lo que es importante contar con referencias específicas según el grupo étnico o región geográfica para aumentar la precisión en las evaluaciones forenses (76).

En general, la mayoría de estos estudios incluyen al cartílago tiroideo como una de las principales estructuras de análisis, dada su prominencia anatómica y su papel funcional dentro de la laringe. En el presente trabajo, aunque se analizarán múltiples estructuras, se priorizará el estudio del cartílago tiroideo por su relevancia morfológica, facilidad de acceso durante la disección y por ser una de las principales fuentes de variabilidad entre sexos.

Según nuestra revisión la variabilidad laríngea se ha analizado mediante mediciones lineales y angulares simples, un abordaje propio de la morfometría tradicional. Este enfoque se centra en la cuantificación directa de parámetros anatómicos específicos y resulta especialmente útil cuando se dispone de estructuras físicas bien delimitadas y fácilmente medibles.

La morfometría geométrica (MG), previamente descrita, permite cuantificar variaciones en la forma y tamaño de estructuras anatómicas mediante puntos de referencia homologables (landmarks) con un análisis tridimensional (6). Aplicada al estudio de la laringe, esta técnica posibilita el análisis detallado de su arquitectura tridimensional, lo cual es crucial para entender su función biomecánica y fonatoria. Este enfoque utiliza modelos escaneados y la digitalización de puntos anatómicos (landmarks) y curvas (semilandmarks), los cuales se alinean mediante superposición de Procrustes. Se calcula el tamaño centroidal y se analizan relaciones alométricas. Para controlar errores, se repite la marcación y se aplica un ANOVA de Procrustes que identifica componentes de simetría y asimetría. Las diferencias entre sexos o grupos se evalúan con análisis multivariados mediante MANOVA y Análisis de Variables Canónicas (CVA) (6). Esta metodología resulta útil para caracterizar estructuras blandas como la laringe, tanto en contextos anatómicos como funcionales.

En este proyecto se adopta un enfoque de morfometría tradicional con definición de diferentes puntos landmarks, que implica la identificación precisa de puntos anatómicos clave para la toma de medidas. Este método es considerado adecuado para el estudio detallado de estructuras cartilaginosas conservadas y fijadas. Permite generar un conjunto robusto de datos morfológicos útiles tanto para la comparación intragrupal como intergrupala, y a partir de estos datos, desarrollar

y evaluar la viabilidad y aplicabilidad de protocolos operativos para la obtención de información para el modelado tridimensional del cartílago tiroideos y cricoides.

3.2.4. TECNOLOGÍA DE ESCANEEO, MODELADO E IMPRESIÓN 3D EN ANATOMÍA

La anatomía constituye un pilar fundamental en la formación de los profesionales de la salud (88). Por ello, resulta crucial identificar y desarrollar herramientas que optimicen los procesos de aprendizaje y estudio en esta disciplina. El estudio anatómico se apoya significativamente en la visualización espacial tridimensional, lo que implica un desafío particular al abordar estructuras complejas. Mientras que los libros de texto ofrecen representaciones bidimensionales, los estudiantes deben realizar una manipulación mental de estas imágenes para comprender la ubicación y conexión de las estructuras en el espacio (88). Este proceso, que demanda habilidades espaciales avanzadas y resulta cognitivamente exigente, puede dificultar el reconocimiento de diferentes estructuras. En contraste, el uso de modelos 3D (tanto virtuales como físicos) facilita esta comprensión al proporcionar una perspectiva continua y tangible de las estructuras, disminuyendo la carga cognitiva y beneficiando incluso a individuos con habilidades espaciales limitadas.

La incorporación de tecnologías tridimensionales ha revolucionado el estudio anatómico, permitiendo la generación de representaciones precisas del cuerpo humano con elevada fidelidad visual y métrica.

3.2.4.1. Tecnología de escaneo 3D

Tradicionalmente, el escaneo anatómico se ha basado en tecnologías como los rayos X, la tomografía computarizada (TC), la resonancia magnética (RM) y el ultrasonido. Estas técnicas han sido esenciales en la práctica clínica diagnóstica al posibilitar la visualización de estructuras internas (19). No obstante, cada una presenta limitaciones, como la necesidad de contacto con el paciente, la exposición a radiación o la dificultad para obtener modelos tridimensionales detallados de superficies externas.

La aparición del escaneo 3D mediante luz estructurada ha abierto nuevas avenidas, especialmente en la obtención precisa de la forma y dimensiones de superficies externas sin contacto físico. Esta tecnología proyecta un patrón de luz sobre un objeto, y una cámara registra la deformación de dicho patrón, generando datos tridimensionales en forma de nube de puntos o malla triangular (19). A diferencia de los métodos tradicionales, este sistema no invasivo reduce el estrés del paciente, optimiza recursos y proporciona modelos virtuales realistas que pueden visualizarse, almacenarse y materializarse mediante impresión 3D.

El principio de funcionamiento de los escáneres 3D se asemeja al de una cámara, ya que combina múltiples imágenes desde distintos ángulos para construir un modelo tridimensional. Las tecnologías más comunes empleadas en la generación de estos modelos incluyen la fotogrametría, la visión estéreo y la proyección estructurada (19). Los modelos resultantes conservan el color, la textura y las proporciones del objeto original, permitiendo identificar características anatómicas que podrían pasar inadvertidas al ojo humano. Esta capacidad es especialmente relevante en anatomía, ya que posibilita la reproducción fiel de estructuras complejas con fines académicos, diagnósticos o quirúrgicos.

Una comparación general entre las tecnologías de escaneo revela sus diferencias funcionales: los rayos X y la TC emplean radiación ionizante para la captura de estructuras internas, siendo particularmente útiles para huesos y órganos sólidos; la RM se basa en campos magnéticos para

la diferenciación de tejidos blandos; el ultrasonido utiliza ondas sonoras, destacándose por su seguridad y carácter no invasivo; mientras que el escáner 3D se centra exclusivamente en la superficie, sin acceso a información interna, pero ofreciendo ventajas en términos de resolución superficial y manipulación digital (19).

Además de la obtención de imágenes de la superficie, el escaneo 3D permite capturar medidas precisas de estructuras anatómicas, lo que facilita el diseño personalizado de implantes, prótesis y modelos con características morfológicas y cromáticas homogéneas (19). Esta versatilidad ha propiciado su integración en diversos campos clínicos, incluyendo el diseño de dispositivos ortopédicos, guías quirúrgicas, análisis postural, modelos para educación médica, reconstrucciones faciales y aplicaciones en realidad aumentada y simulaciones quirúrgicas.

3.2.4.2. Modelado e impresión 3D

Los archivos digitales generados mediante escaneo 3D requieren un proceso de modelado 3D para su optimización antes de la impresión. Este proceso implica la limpieza de la nube de puntos para eliminar ruido, la creación de mallas poligonales que definen la superficie del objeto, y en muchos casos, la segmentación de estructuras anatómicas específicas para su análisis o impresión individual. Los softwares de modelado permiten refinar la geometría, reparar imperfecciones y preparar el archivo digital en un formato compatible con las impresoras 3D (como STL o OBJ).

Los archivos digitales modelados pueden editarse, almacenarse y materializarse en diversos materiales a través de tecnologías de impresión 3D o fabricación aditiva. Esta tecnología, fundamental en el ámbito biomédico, construye objetos tridimensionales mediante la deposición secuencial de capas de material, guiada por modelos digitales (CAD) (89). Su capacidad para utilizar una amplia gama de materiales (como metales, polímeros, cerámicas y biotintas) ha impulsado su adopción en investigación y clínica (19). Diversas tecnologías de impresión 3D son relevantes en anatomía, incluyendo Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA), Digital Light Processing (DLP) y Selective Laser Sintering (SLS). La selección depende de la aplicación, considerando precisión, resistencia y biocompatibilidad. A pesar de sus ventajas (producción rápida, económica y personalizada sin moldes), la impresión 3D puede tener limitaciones en precisión dimensional, costo de materiales y tiempos de impresión para objetos complejos.

Desde su aparición en la década de 1980, la impresión 3D ha transformado la medicina hacia enfoques más personalizados. En anatomía, su capacidad para replicar fielmente estructuras humanas es fundamental para la enseñanza, la planificación prequirúrgica y la innovación médica. Sus aplicaciones clave incluyen la creación de modelos educativos detallados, la simulación quirúrgica, la fabricación de guías quirúrgicas e implantes/prótesis a medida (en especialidades como neurocirugía y cirugía maxilofacial), y la bioimpresión de tejidos (90). Además, facilita la planificación prequirúrgica al mejorar la comprensión anatómica y ofrece una plataforma de entrenamiento de bajo costo para residentes (90), con el potencial para acelerar el aprendizaje quirúrgico (91). En esencia, permite la reproducción precisa de la anatomía individualizada, resaltando su versatilidad y valor en la práctica médica y la formación.

3.2.4.3. Aplicaciones y beneficios en la educación anatómica

Si bien los modelos clásicos de aprendizaje y enseñanza ofrecen una experiencia táctil directa y la posibilidad de explorar la variabilidad anatómica real, los modelos tridimensionales digitales proporcionan una visualización precisa y manipulable de estructuras complejas que, por su

disposición profunda y su conformación por múltiples componentes cartilaginosos, musculares y mucosos, resultan especialmente difíciles de abordar en el aprendizaje inicial.

Los modelos 3D permiten rotar, aislar y ampliar estructuras específicas, lo cual favorece el razonamiento espacial y la identificación anatómica, particularmente en estudiantes con menores habilidades visuoespaciales. Aunque no sustituyen completamente la riqueza formativa de la disección, sí representan una herramienta complementaria eficaz para fortalecer la comprensión estructural y funcional de órganos complejos. En este sentido, su integración en programas de formación anatómica puede potenciar el aprendizaje autónomo y la preparación previa a experiencias prácticas, contribuyendo a un enfoque pedagógico más accesible e individualizado (92). Los modelos impresos en 3D aportan numerosos beneficios a la educación médica. Ofrecen un marco excelente para la anatomía básica y pueden personalizarse para adaptarse a diversos escenarios. Además, los modelos 3D pueden almacenarse y utilizarse repetidamente (25).

Los escáneres 3D se han consolidado como herramientas complementarias a las tecnologías de imagen convencionales. Su utilidad radica en la mejora de procesos clínicos y de investigación, la personalización de tratamientos y la posibilidad de desarrollar herramientas, prótesis, órtesis y réplicas óseas adaptadas a cada paciente. Estas capacidades convierten al escaneo 3D en una tecnología con un amplio potencial para la innovación en medicina personalizada, bioingeniería y enseñanza anatómica.

3.2.5. MODELADO E IMPRESIÓN 3D DE LARINGE

El modelado tridimensional de la laringe plantea desafíos técnicos intrínsecos, dada la complejidad y la naturaleza delicada de sus componentes cartilaginosos. Los cartílagos laríngeos, caracterizados por su delgadez y, en algunos casos, por su susceptibilidad a la deformación, exigen una selección meticulosa de las técnicas de escaneo. Métodos como el escaneo 3D con luz estructurada, aunque preciso para superficies, deben aplicarse con cuidado para evitar la deformación por contacto o la captura incompleta de áreas complejas. La tomografía computarizada de baja dosis podría ofrecer una alternativa para obtener información volumétrica, aunque la resolución para detalles superficiales finos podría ser limitada. En el ámbito del modelado 3D, los softwares especializados deben permitir la manipulación precisa de mallas complejas, la segmentación de estructuras individuales y la preservación de las relaciones anatómicas sutiles entre los cartílagos, los músculos y la mucosa. La consideración de la variabilidad anatómica individual es también crucial durante el proceso de modelado.

Un aspecto fundamental en la impresión 3D de la laringe es la elección de materiales que puedan simular adecuadamente las propiedades biomecánicas de los diversos tejidos laríngeos. El cartílago, con su elasticidad y resistencia, podría requerir polímeros específicos o composites. La simulación de la consistencia del músculo y la mucosa presenta desafíos aún mayores. La investigación en la impresión multimaterial es prometedora, ya que permitiría la creación de modelos con diferentes grados de rigidez y textura en distintas regiones anatómicas, replicando con mayor fidelidad la complejidad tisular de la laringe (93).

La validación de la precisión de los modelos laríngeos impresos es un paso crítico para asegurar su utilidad clínica y educativa. Se emplean diversas métricas para cuantificar la fidelidad anatómica, incluyendo la distancia punto a punto entre el modelo impreso y los datos de referencia (obtenidos de escaneos o modelos digitales segmentados de anatomía real). La superposición digital de los modelos impresos con imágenes de tomografía computarizada o

resonancia magnética permite evaluar la congruencia espacial. Además, la evaluación cualitativa por parte de expertos en anatomía y cirujanos otorrinolaringólogos es esencial para identificar posibles imprecisiones o artefactos que podrían comprometer la utilidad del modelo.

La obtención e impresión de modelos 3D del cartílago tiroideos, en particular, han demostrado ser valiosas en cirugías de resección laríngea que afectan la comisura anterior (94). Estos modelos facilitan una reconstrucción anatómicamente precisa del marco laríngeo, manteniendo su forma y soporte estructural, lo que favorece la movilidad del cartílago aritenoso, reduce el riesgo de aspiración, mejora la calidad de la fonación y acorta la recuperación. La personalización que ofrece esta tecnología supone una ventaja significativa sobre los métodos convencionales, optimizando los resultados funcionales y la calidad de vida del paciente.

En el ámbito de la simulación y formación quirúrgica, los modelos 3D de la laringe ofrecen soluciones innovadoras. En procedimientos como la laringoplastia de medialización, la dificultad para reconocer la anatomía específica de una población puede conducir a errores y una mala calidad vocal (90). Modelos anatómicos precisos pueden suplir la necesidad de experiencia práctica ante la limitada disponibilidad de laringes cadavéricas para el entrenamiento de residentes. En otorrinolaringología, se han explorado aplicaciones en la fabricación de dispositivos y modelos para la planificación de diversas cirugías de la vía aérea (90). También se han desarrollado modelos de planificación quirúrgica a partir de reconstrucciones tomográficas, que son accesibles, seguros y útiles para la simulación quirúrgica por personal sin experiencia (90).

Los modelos impresos en 3D aportan múltiples beneficios a la educación médica, proporcionando un marco excelente para la anatomía básica y la personalización (25). La baja frecuencia de algunos procedimientos de la vía aérea limita las oportunidades de familiarización técnica para los residentes (95), resaltando la necesidad de alternativas de entrenamiento. El conocimiento anatómico y la experiencia son cruciales, y aunque el estudio con modelos animales o cadáveres es común para procedimientos poco frecuentes (92), los modelos 3D representan una herramienta complementaria valiosa, al ser almacenables y reutilizables (25).

3.2.6. PROTOCOLOS OPERATIVOS ESTANDARIZADOS

A partir de la revisión de los antecedentes y fundamentos conceptuales, se identifican vacíos significativos en la caracterización tridimensional de los cartílagos laríngeos, particularmente más allá del cartílago tiroideos. El número limitado de estudios que integran escaneo, modelado e impresión de estos cartílagos en conjunto restringe la posibilidad de generar representaciones morfológicamente precisas que resulten útiles tanto en docencia como en contextos clínico-quirúrgicos. Según lo anterior, persiste la necesidad de establecer protocolos de disección, escaneo y medición que aseguren la fidelidad anatómica de los modelos generados y su reproducibilidad.

Este trabajo busca dar respuesta a dichas brechas desde un enfoque integral —anatómico, morfométrico y tecnológico— mediante el diseño de una ruta metodológica que permita obtener modelos tridimensionales de alta precisión, comparables entre sí y susceptibles de validación. Esta propuesta no solo aporta al estudio anatómico de la laringe, sino que también sienta las bases para la construcción de bancos digitales que respalden futuros desarrollos en cirugía, docencia y rehabilitación.

Un Protocolo Operativo Estandarizado (POE) es un documento técnico que describe, de manera clara y secuencial, las actividades necesarias para ejecutar un procedimiento específico, con el fin de garantizar su reproducibilidad, eficiencia y calidad (96). En el ámbito de la investigación anatómica y biomédica, el POE permite estandarizar las fases de preparación, manipulación, escaneo y postprocesamiento de especímenes, reduciendo la variabilidad entre operadores y asegurando la consistencia de los resultados (96). Esto es crucial para la validez y comparabilidad de los datos obtenidos en estudios científicos.

En el presente estudio, la creación y aplicación de un POE resulta fundamental para la obtención de modelos anatómicos precisos de los cartílagos laríngeos. Su diseño contempla la definición de parámetros específicos para la disección, el posicionamiento de los cartílagos, las condiciones del escaneo tridimensional y las etapas de limpieza, alineación y exportación de las mallas digitales. Además, permitirá documentar de forma rigurosa cada procedimiento, favoreciendo su replicación en otros entornos académicos o clínicos.

El POE funciona también como un puente entre el conocimiento anatómico tradicional y las tecnologías digitales, al traducir el saber morfológico en una secuencia técnica organizada. Esta estandarización resulta clave para asegurar que los modelos tridimensionales no solo sean visualmente adecuados, sino también anatómicamente precisos y comparables. En ese sentido, el desarrollo de un POE específico para cartílagos laríngeos representa un aporte metodológico original y necesario para la construcción sistemática de bancos digitales anatómicos y la estandarización de futuras investigaciones en morfometría 3D de la laringe.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar modelos tridimensionales anatómicamente precisos de cartílagos laríngeos humanos, a partir de especímenes disponibles en el Laboratorio de Anatomía de una universidad del suroccidente colombiano

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la morfometría de los cartílagos laríngeos mediante observación directa y digital
- Obtener los modelos 3D cartílagos laríngeos humanos
- Validar la precisión de los modelos 3D generados con técnicas de medición digital y directa

5. METODOLOGÍA

5.1. TIPO DE ESTUDIO

Este estudio se clasifica como una investigación cuantitativa, aplicada, con un enfoque descriptivo y exploratorio (97). Se enmarca dentro de los estudios no experimentales de campo, orientados a la innovación tecnológica en el ámbito anatómico. Su objetivo es desarrollar modelos tridimensionales anatómicamente precisos de cartílagos laríngeos humanos, a partir de especímenes cadavéricos, integrando técnicas de disección anatómica, escaneo 3D, procesamiento digital e impresión tridimensional.

Aunque no se manipulan variables independientes en el sentido clásico de un experimento controlado, se implementan procedimientos sistematizados de observación, medición y análisis morfométrico que permiten establecer rutas metodológicas replicables. En este sentido, la investigación también puede clasificarse como una investigación metodológica o de desarrollo instrumental, ya que su principal resultado consiste en la creación de herramientas técnicas (protocolos) para ser aplicadas en contextos académicos, clínicos y quirúrgicos.

Este tipo de estudio es particularmente útil cuando se busca generar productos concretos y transferibles que respondan a una necesidad en un campo aplicado del conocimiento, como lo es la anatomía en el contexto biomédico. El trabajo combina el rigor cuantitativo con la innovación metodológica, aportando soluciones prácticas a partir de la integración de conocimiento anatómico y tecnologías emergentes.

5.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población inicial para este estudio estuvo conformada por doce (12) especímenes laríngeos disponibles en el Laboratorio de Anatomía Humana de la Universidad del Valle. De esta población, se seleccionaron laringes humanas provenientes de cadáveres adultos, que no presentaban alteraciones anatómicas evidentes en sus cartílagos laríngeos.

La muestra fue de tipo no probabilístico por conveniencia e incluyó un total de seis (6) laringes humanas. Para estas se conocía el sexo, cumpliendo con los criterios de inclusión del estudio. Inicialmente, dos (2) de estos especímenes se utilizaron como pilotos de disección, lo que permitió al equipo investigador adquirir la experticia necesaria en la actividad. Tras aplicar los criterios de exclusión, se seleccionaron cuatro (4) especímenes finales para el análisis. De estos cuatro especímenes, se obtuvieron mediciones directas, se analizaron las imágenes resultantes del escaneo 3D y, posteriormente, se evaluaron las réplicas impresas en 3D de sus cartílagos mayores tiroides y cricoides.

5.3. CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

La selección de los especímenes laríngeos para este estudio se rigió por los siguientes criterios

5.3.1. Criterios de inclusión

- Disponibilidad en el Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle.
- Registro de datos sobre sexo del espécimen.
- Adecuado estado de conservación e integridad física de la laringe.
- Autorización para uso en investigación, con aval del comité de ética pertinente.
- Ausencia de patologías que alteren su morfología natural, como condiciones neoplásicas (cáncer) o evidencia de traumatismos.

- Sin antecedentes de cirugías laríngeas previas.

5.3.2. Criterios de exclusión

- Integridad comprometida de los cartílagos laríngeos o estructuras adyacentes después de la disección del tejido que los recubre, lo que afectaría la precisión de las mediciones o el modelado 3D.

5.4. LABORATORIOS DE TRABAJO

Las actividades se desarrollaron en dos laboratorios adscritos al Sistema Institucional Integrados de Laboratorios de la Universidad del Valle SIILUV; el Laboratorio de Anatomía de la Facultad de Salud y el Laboratorio Estratégico Compartido de Fabricación Digital.

5.4.1. Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle

El Laboratorio de Anatomía ubicado en el Departamento de Morfología de la Universidad del Valle es un espacio académico especializado en la enseñanza práctica y la investigación en anatomía humana. Está orientado a apoyar la formación de estudiantes de pregrado y posgrado en áreas de la salud mediante el estudio de cuerpos humanos y piezas anatómicas. Este laboratorio permite la realización de prácticas complementarias al aprendizaje teórico, facilitando la comprensión de la organización estructural del cuerpo humano. Además, es un entorno habilitado para el desarrollo de investigaciones morfológicas, con énfasis en el estudio de variaciones anatómicas. Su infraestructura y lineamientos garantizan condiciones éticas y técnicas adecuadas para el trabajo con material cadavérico.

<https://sigelab.net/laboratorio/1QaCM2eFazq742TiJN2N>

5.4.2. Laboratorio Estratégico Compartido (LEC) de Fabricación Digital

El Laboratorio Estratégico Compartido – LEC – de Fabricación Digital es un laboratorio especializado en brindar soluciones innovadoras para el desarrollo de proyectos de diseño y desarrollo de productos. El enfoque principal de este laboratorio se centra en ofrecer servicios integrales de tecnologías habilitadoras de la industria 4.0 como impresión 3D, router CNC, escáner 3D, corte laser, modelado 3D y simulación mediante programas especializados.

<https://sigelab.net/laboratorio/EgXFvSHIQN0EOfdG5MqJ>

5.5. VARIABLES

Las variables consideradas en este estudio fueron de tipo cuantitativo continuo y corresponden a medidas morfométricas obtenidas de los cartílagos laríngeos tiroideos y cricoides, tanto en sus formas anatómicas cadavéricas como en los modelos digitales y físicos impresos en 3D.

Es importante mencionar que, si bien en el presente estudio el análisis se centró específicamente en los dos cartílagos de mayor tamaño de la laringe, el Protocolo Operativo Estandarizado de Medición de Cartílagos Laríngeos (*Anexo 3*) fue diseñado para contemplar mediciones adicionales. Este protocolo incluye no solo los cartílagos articulados (para comprender sus relaciones), sino también el cartílago epiglótico y los cartílagos aritenoides, lo que amplía su aplicabilidad futura.

A continuación, la *Tabla 2* detalla las variables analizadas en este estudio, que son las medidas de los cartílagos mencionados. Para una descripción exhaustiva de cada medición, se recomienda consultar el *Anexo 3*.

Variable	Tipo	Unidad de medida	Descripción
Cartílago tiroideo			
Angulo entre puntos anatómicos de referencia (landmarks)	Cuantitativa continua	Grados (°)	Tres (3) medidas angulares a tres alturas diferentes, considerando tres (3) puntos de referencia anatómicos (landmarks)
(AT; ITS) Angulo a la altura de la incisura superior (AT; PL) Angulo a la altura de la prominencia laringe (AT; ITI) Angulo a la altura de la escotadura inferior			
Longitud entre puntos anatómicos de referencia (landmarks)	Cuantitativa continua	Milímetros (mm)	Treinta y tres (33) medidas longitudinales entre dieciséis (16) puntos de referencia anatómico (landmarks)
ITS.c <-> CA Segmento entre el centro de la incisura tiroidea superior y la comisura anterior CA <-> ITI.c Segmento entre la comisura anterior y el centro de incisura tiroidea inferior ITS.c <-> PL.c Segmento entre el centro de la incisura tiroidea superior y el centro de la prominencia laríngea PL.c <-> ITI.c Segmento entre el centro de la prominencia laríngea y el centro de la incisura tiroidea inferior ITS.c <-> ITI.c Segmento entre el centro de la incisura tiroidea superior y el centro de la incisura tiroidea inferior *AS.r <-> ITS.c Segmento entre la raíz de la asta superior y el centro de la incisura tiroidea superior *Al.r <-> ITI.c Segmento entre la raíz de la asta inferior y el centro de la incisura tiroidea inferior *ITS.c <-> BP.t.c Segmento entre el centro de la incisura tiroidea superior y el centro del borde posterior tiroideo *PL.c <-> BP.t.c Segmento entre el centro de la prominencia laríngea y el centro del borde posterior tiroideo *ITI.c <-> BP.t.c Segmento entre el centro de la incisura tiroidea superior y el centro del borde posterior tiroideo **BP.t.c (D) <-> BP.t.c (I) Segmento entre centro del borde posterior tiroideo derecho y el centro del borde posterior tiroideo izquierdo **AS.p(D) <-> AS.p(I) Segmento entre la punta de la asta superior derecha y la punta de la asta superior izquierda **AS.r(D) <-> AS.r(I) Segmento entre la raíz de la asta superior derecha y la raíz de la asta superior izquierda **Al.r(D) <-> Al.r(I) Segmento entre la raíz de la asta inferior derecha y la raíz de la asta inferior izquierda **Al.p(D) <-> Al.p(I) Segmento entre la punta de la asta inferior derecha y la punta de la asta inferior izquierda *AS.p <-> AS.r Segmento entre la punta de la asta superior y la raíz de la asta superior *AS.r <-> Al.r Segmento entre la raíz de la asta superior y la raíz de la asta inferior *Al.r <-> Al.p Segmento entre la raíz de la asta inferior y la punta de la asta inferior *AS.p <-> Al.p Segmento entre la punta de la asta superior y la punta de la asta inferior			
Cartílago cricoides			
Longitud entre puntos anatómicos de referencia (landmarks)	Cuantitativa continua	Milímetros (mm)	Quince (15) medidas longitudinales entre nueve (9) puntos de referencia anatómico (landmarks)

CM.s <-> CM.i	Segmento entre la punta superior de la cresta mediana y la punta inferior de la cresta mediana
AR.s <-> TC.c	Segmento entre el punto superior del arco y el centro del tubérculo cricoideo
TC.c <-> PC.p	Segmento entre el centro del tubérculo cricoideo y la punta del pico del cricoides
AR.s <-> PC.p	Segmento entre el punto superior del arco y la punta del pico del cricoides
**CM.s <-> AR.s	Segmento entre la punta superior de la cresta mediana y el punto superior del arco
**c.SA.t.c (D) <-> c.SA.t.c (I)	Segmento entre el centro de la superficie articular del tiroides derecha y el centro de la superficie articular del tiroides izquierda
**CM.i <-> PC.p	Segmento entre la punta inferior de la cresta mediana y el punto del pico del cricoides
*c.SA.t.c <-> TC.c	Segmento entre el centro de la superficie articular del tiroides y el centro del tubérculo cricoideo
*c.SA.a.c <-> AR.s	Segmento entre el centro de la superficie articular del aritenoides y el punto superior del arco
c.SA.a.c (D) <-> c.SA.a.c (I)	Segmento entre el centro de la superficie articular del aritenoides derecha y el centro de la superficie articular del aritenoides izquierda

Tabla 2 Variables consideradas para el análisis de los cartílagos laríngeos tiroides y cricoides. *Medida bilateral.

**Medida interna y externa

5.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS

La recolección de los datos morfométricos se realizó a partir de tres procedimientos complementarios, garantizando una evaluación exhaustiva de los especímenes: la medición directa sobre los cartílagos laríngeos disecados, la medición digital sobre los modelos tridimensionales generados mediante escaneo, y la medición sobre los modelos físicos impresos en 3D.

Para llevar a cabo estas fases, se emplearon los siguientes instrumentos y software, cuyas fichas técnicas y certificados de calibración se detallan en el *Anexo 4*:

- **Kit de disección básico:** utilizados para realizar los procesos de disección de los cartílagos laríngeos
- **Calibrador digital de precisión (Pie de Rey Mitutoyo 500-197-30):** utilizado para obtener las medidas anatómicas lineales en especímenes reales y modelos físicos. Este instrumento cuenta con una precisión de $\pm 0,02$ mm. y cuenta con su respectivo certificado de calibración
- **Goniómetro Baseline -12-1034HR:** empleado para la medición de ángulos anatómicos, tanto en especímenes cadavéricos como en modelos impreso en 3D
- **Escáner EinScan Pro HD (Shining 3D®):** empleado para la digitalización de los cartílagos laríngeos en alta resolución
- **Software EXScan 4.0 (Shining 3D®):** utilizado para la captura, procesamiento inicial y la realización de las mediciones sobre los modelos tridimensionales digitales.
- **Software de diseño y preparación para impresión 3D (Chitubox):** empleado para la edición, reparación y optimización de los modelos digitales antes de su envío a la impresora 3D.
- **Matriz de datos (Microsoft Excel®):** diseñada específicamente para organizar, registrar y comparar los valores obtenidos en cada fase del estudio. Esta herramienta también facilitó el cálculo de porcentajes de error, variabilidad y concordancia entre los diferentes tipos de modelos.

- **Microscopio Meiji Techno 20-70x:** utilizado para la inspección detallada de las estructuras anatómicas, permitiendo la observación de pequeños detalles y la verificación de la precisión de los puntos anatómicos de referencia
- **Lampara lupa:** empleada para proporcionar iluminación y aumento durante los procesos de disección, mejorando la visibilidad y la precisión en el trabajo con especímenes.
- **Impresora Anycubic / Photon Mono M5s:** impresora 3D de resina (SLA/DLP) utilizada para la fabricación de réplicas de alta resolución de los cartílagos laríngeos, lo que permite obtener modelos con gran detalle superficial.
- **Anycubic / Wash & Cure 2.0:** estación de lavado y curado post-impresión utilizada para limpiar y post-curar las piezas impresas en resina con la impresora Anycubic / Photon Mono M5s, asegurando su acabado y resistencia final.
- **Impresora 3D FDM Artillery Sidewinder X2:** impresora 3D de modelado por deposición fundida (FDM) utilizada para la fabricación de modelos físicos adicionales o de mayor tamaño, complementando la producción de réplicas.
- **Computador de mesa:** equipo de mesa con especificaciones técnicas detalladas (Intel(R) Core(TM) i7-, 64 GB RAM, NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti (8 GB)) utilizado para análisis de imágenes tridimensionales.
- **Computador portátil Lenovo Legion 5 17IMH05H:** equipo portátil con especificaciones técnicas detalladas (Intel(R) Core(TM) i7-10750H CPU @ 2.60GHz, 16.0 GB RAM, 238 GB SSD + 932 GB HDD, NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti (6 GB)) utilizado para análisis de imágenes tridimensionales.
- **Software de procesamiento de texto (Microsoft Word®):** empleado para la redacción y edición del presente documento, incluyendo la organización del contenido y la generación de tablas y figuras.
- **Software de gestión de referencias bibliográficas (Mendeley):** empleado para la gestión, organización y citación de las referencias bibliográficas a lo largo del estudio, garantizando el cumplimiento del estilo Vancouver.

5.7. CONSIDERACIONES ÉTICAS

Esta investigación se adhirió a los principios éticos establecidos en la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud de Colombia y a los lineamientos internacionales del Código de Núremberg (1947), la Declaración de Helsinki (1964), el Informe Belmont (1978) y las Pautas CIOMS (2016). En concordancia con estos marcos normativos, el estudio se rigió por los principios de respeto, autonomía, beneficencia y justicia. Se clasificó como una investigación de riesgo mínimo, asociada principalmente al manejo confidencial de los datos y especímenes.

El proyecto cuenta con el aval del Comité de Ética en Investigación en Salud de la Universidad del Valle (código E013-024) otorgada el 06 de mayo de 2024 y con renovación el 03 de junio de 2025. Este aval garantizó el cumplimiento de todas las normas éticas y científicas requeridas para el desarrollo de estudios con material biológico humano.

Las fases II y III del estudio se llevaron a cabo en el Laboratorio de Anatomía del Departamento de Morfología de la Universidad del Valle. Este laboratorio posee un anfiteatro autorizado conforme al Decreto 2493 de 2004 y opera siguiendo los lineamientos establecidos en la Guía de Procedimientos del Área de Anatomía, el Manual de Bioseguridad del Departamento y los Lineamientos Nacionales de Bioseguridad para Laboratorios de la Red Nacional.

Durante el desarrollo del estudio, se manipularon especímenes biológicos y sustancias químicas utilizadas para su conservación. Todos estos materiales fueron debidamente etiquetados y almacenados según su nivel de riesgo. La gestión de los residuos generados se realizó conforme al Manual para el Manejo Integral de Residuos Biológicos de la Universidad del Valle.

Asimismo, para las actividades realizadas en el Laboratorio Estratégico Compartido (LEC) de Fabricación Digital, se contó con los permisos institucionales respectivos.

Todas las consideraciones éticas detalladas, junto con los documentos de aval de comités, permisos institucionales y guías de bioseguridad, se consolidan y adjuntan en un Anexo único denominado "Consideraciones Éticas del Proyecto" (*Anexo 5*), con el fin de facilitar su consulta y verificación.

5.8. DESARROLLO METODOLÓGICO

La presente investigación se estructuró en seis fases consecutivas, con actividades diseñadas para abordar de manera integral el objetivo general de desarrollar modelos tridimensionales anatómicamente precisos de cartílagos laríngeos humanos a partir de especímenes cadavéricos. La integración sistemática de estas fases permitió una transición metodológica coherente, asegurando la rigurosidad y validez de los datos obtenidos, y cada una respondió directamente a los objetivos específicos del estudio.

Las fases I y VI constituyeron los pilares de planificación y consolidación. La Fase I se centró en la planificación inicial y la estructuración del anteproyecto, obteniendo las autorizaciones éticas y administrativas fundamentales para la ejecución del estudio. Esto incluyó el aval del Comité de Ética en Investigación en Salud de la Universidad del Valle (código E013-024) y la gestión de permisos para el uso de las instalaciones del Laboratorio de Anatomía y del Laboratorio Estratégico Compartido de Fabricación Digital. La Fase VI, la culminante del estudio, se dedicó a la sistematización y organización de todos los hallazgos obtenidos durante las fases precedentes (I, II, III, IV y V). En dicha fase se elaboró el informe final, detallando los procedimientos, los resultados y una discusión profunda sobre la precisión de los modelos 3D generados, además de presentar las conclusiones sobre la eficacia de los protocolos de escaneo y fabricación.

El primer objetivo específico, referente a la *caracterización morfométrica de los cartílagos laríngeos mediante observación directa y digital*, se abordó con las actividades desarrolladas en las fases II y III. En la Fase II, se realizó una exhaustiva revisión del estado del arte en anatomía laríngea, morfometría laríngea y modelado 3D de la laringe. Paralelamente, se prepararon los especímenes y se llevaron a cabo pruebas piloto de disección y escaneo, actividades que fueron fundamentales para la creación y validación de los Protocolos Operativos Estandarizados (POE) de disección, escaneo y medición morfométrica de la laringe. Posteriormente, la Fase III utilizó estos POE para obtener especímenes laríngeos disecados de forma óptima y generar modelos tridimensionales precisos a partir de escaneo de luz estructurada. En esta fase, se obtuvieron datos morfométricos tanto de los modelos cadavéricos como de los modelos tridimensionales digitales, los cuales serían analizados en la fase de validación.

El segundo objetivo específico, enfocado en *obtener modelos 3D físicos de cartílagos laríngeos humanos*, se desarrolló con las actividades de la Fase IV. Durante esta fase, los modelos digitales generados y optimizados en la fase III fueron preparados para su impresión y materializados en resina. Se realizó el postprocesamiento de las piezas impresas para asegurar

su calidad. Una vez listas, las réplicas físicas se sometieron a mediciones, permitiendo así considerar las tres formas de medición (cadavérica, digital 3D y en modelos impresos en 3D) que serían objeto de análisis en la fase V.

Finalmente, el tercer y último objetivo específico, que busca *validar la precisión de los modelos 3D generados con técnicas digitales y de medición directa*, se abordó en la Fase V. En esta etapa, se realizó un análisis comparativo y validación de la precisión geométrica de los modelos. Se compararon las dimensiones obtenidas de los especímenes cadavéricos, los modelos digitales 3D y los modelos físicos impresos en resina. Para ello, se emplearon modelos lineales mixtos para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los métodos de medición, controlando la variabilidad individual. Posteriormente, para cuantificar la distorsión morfométrica introducida en cada etapa del proceso (digitalización, impresión y acumulada), se calcularon la distorsión media absoluta, la distorsión media con signo y el error cuadrático medio (RMSE), lo que permitió evaluar la fidelidad y precisión global de los modelos generados.

A continuación, se describirá cada una de las fases y las actividades realizadas en detalle.

5.8.1. Fase I: Consolidación del proyecto y autorizaciones

Esta fase inicial tuvo como propósito establecer las condiciones institucionales, éticas y logísticas necesarias para el desarrollo del estudio. Comprendió el periodo entre agosto de 2023 y mayo de 2024. Inicialmente, una propuesta de investigación fue elaborada por el investigador principal y avalada por los coinvestigadores: Sonia Osorio Toro, Alejandro Rodríguez Campo y Nathalia Díaz Vallejo. La incorporación de la profesora Nathalia Díaz Vallejo como coinvestigadora se formalizó en respuesta a la convocatoria para estudiantes de maestría “Oportunidad de investigación en el Laboratorio de Fabricación Digital de la Universidad del Valle”, beneficio otorgado al estudiante el 29 de febrero de 2024 (*Anexo 7*)

Posteriormente, se solicitaron y obtuvieron los permisos institucionales para desarrollar las actividades del proyecto en los espacios correspondientes de la Universidad del Valle: el Laboratorio de Anatomía del Departamento de Morfología y el Laboratorio Estratégico Compartido de Fabricación Digital. El aval de la coordinadora del Laboratorio de Anatomía, Luz Edith Pérez Trejos, fue recibido el 2 de abril de 2024, y el del coordinador del Laboratorio de Fabricación Digital, Fernando Luna Vera, el 8 de abril de 2024.

Con la obtención de estos permisos institucionales, el protocolo de investigación fue sometido al Comité de Ética en Investigación en Salud de la Universidad del Valle. El 6 de mayo de 2024, se recibió el aval con código E013-024, firmado por Beatriz Eugenia Fernández Hurtado, quien fungía como presidenta del comité en ese momento. Esta aprobación garantizó el cumplimiento de los principios éticos para el uso de especímenes humanos con fines académicos y científicos. Durante esta fase, también se realizó la planificación detallada de las fases metodológicas del proyecto, incluyendo la elaboración del cronograma, la identificación de los recursos técnicos y humanos necesarios, y la delimitación de responsabilidades entre los integrantes del equipo de trabajo. Esta etapa sentó una base sólida para el desarrollo riguroso, ético y técnicamente viable de la investigación.

5.8.2. Fase II: Revisión del estado del arte y preparación de especímenes

La Fase II de la investigación incluyó tres actividades fundamentales, las cuales contribuyeron al desarrollo de tres Protocolos Operativos Estandarizados (POE). Como primera actividad, se llevó a cabo una revisión exhaustiva del estado del arte con el fin de identificar información relevante sobre la anatomía laríngea, estudios morfométricos previos y las estrategias empleadas en el modelado tridimensional de los cartílagos laríngeos. Como segunda actividad, se realizaron pruebas piloto y exploraciones en los dos laboratorios donde se ejecutarían las actividades experimentales. Dichas actividades permitieron realizar ensayos esenciales para el diseño y la elaboración de dos protocolos: el protocolo de disección y el protocolo de Escaneo. Como actividad final, con la información analizada y las habilidades adquiridas, se desarrolló el Protocolo de medición de cartílagos laríngeos. El establecimiento de estos tres POE constituyó la base para la ejecución del estudio experimental. A continuación, se detallan las actividades realizadas durante esta fase.

5.8.2.1. Revisión del estado del arte

La revisión del estado del arte se fundamentó en la necesidad de obtener conocimiento especializado sobre la anatomía, morfología y modelado tridimensional de la laringe humana, con énfasis en la caracterización morfológica en grupos poblacionales específicos.

Durante noviembre de 2023, se realizaron búsquedas sistemáticas en las bases de datos PubMed, ScienceDirect, Ovid-MEDLINE y LILACS, esta última consultada a través de la Biblioteca Virtual en Salud (BVS) mediante las credenciales institucionales de la Universidad del Valle. Estas bases fueron seleccionadas por su amplia cobertura en ciencias de la salud, disponibilidad de literatura biomédica actualizada y acceso a estudios tanto clínicos como básicos.

Las búsquedas se enfocaron en tres ejes temáticos centrales:

- Anatomía de la laringe.
- Morfometría laríngea.
- Modelado tridimensional de la laringe y sus cartílagos.

Como estrategia de fortalecimiento metodológico, se participó en seis capacitaciones ofrecidas por la División de Bibliotecas de la Universidad del Valle. Estas sesiones se centraron en el uso de recursos electrónicos, técnicas de búsqueda avanzada, manejo de gestores bibliográficos y herramientas especializadas para investigadores. Adicionalmente, se cursó la asignatura "Buenas Prácticas en Producción Científica" (código 601021) con la bibliotecóloga María Teresa Alarcón, quien también facilitó las capacitaciones mencionadas. Asimismo, se llevaron a cabo seminarios de investigación trimestrales con el equipo de trabajo, los cuales permitieron discutir avances, retroalimentar estrategias y enriquecer el desarrollo del marco teórico.

El proceso se inició con la identificación de términos MeSH (Medical Subject Headings), ampliados con sinónimos y palabras clave extraídas del lenguaje controlado de PubMed. Para la búsqueda en LILACS, se utilizaron los términos DeCS (Descriptores en Ciencias de la Salud). Los términos Mesh utilizados para el eje de búsqueda de anatomía corresponden a Larynx, Laryngeal Cartilages, Anatomy, Thyroid Cartilage, Cricoid Cartilage, Arytenoid Cartilages, Epiglottis. Los términos utilizados para el eje de morfometría laríngea corresponden a Larynx, Laryngeal Cartilages y términos no indexados como términos mesh. Para el eje de modelado tridimensional de laringe o sus cartílagos se utilizó los términos Larynx, Laryngeal Cartilages, Printing, Three-Dimensional, Computer-Aided Design, Imaging, Three-Dimensional. Las

Imágenes 1, 2 y 3 (disponibles en anexo 10) ilustran los términos utilizados para cada eje temático: los términos MeSH/DeCS aparecen en negrita, los sinónimos en texto plano y los términos no indexados pero frecuentemente empleados por los autores se presentan en cursiva subrayada y resaltados en amarillo.

Para refinar los resultados, se emplearon indicadores de campo [TIAB] (título y resumen), y se construyeron ecuaciones de búsqueda utilizando operadores booleanos OR y AND. También se incorporaron términos emergentes identificados durante la revisión preliminar de artículos relevantes. Cada eje temático fue abordado inicialmente en PubMed, integrando términos MeSH, sinónimos y emergentes, filtrando los resultados desde el año 2010 hasta la actualidad. Posteriormente, se continuó la búsqueda en ScienceDirect, que permite ecuaciones más limitadas (máximo ocho descriptores), por lo que se precisaron los términos y campos de búsqueda. En Ovid-MEDLINE se diseñaron ecuaciones por líneas, permitiendo relaciones entre términos y una mayor precisión en los resultados. Finalmente, en LILACS, se emplearon los términos DeCS correspondientes, los cuales ofrecieron un enfoque más específico y delimitado. Se construyeron ecuaciones de búsqueda específicas para cada eje temático, aplicadas de forma sistemática en las cuatro bases de datos. Las *Tablas 1, 2 y 3* detallan dichas ecuaciones a utilizar en cada base de datos, incluyendo los términos utilizados, filtros aplicados, cantidad de artículos recuperados y los criterios de inclusión/exclusión definidos para cada base (anexo 10).

Como complemento al proceso de búsqueda sistemática en bases de datos, se utilizó inteligencia artificial mediante las plataformas Elicit y Paper Connect. En estas herramientas se formularon preguntas clave relacionadas con los tres ejes temáticos del estudio, lo que permitió generar listas automatizadas de artículos potencialmente relevantes. Las listas de artículos generadas por estas herramientas fueron contrastadas con los resultados ya recuperados en las búsquedas sistemáticas. Aquellos artículos sugeridos por la inteligencia artificial que no se encontraban previamente en las bases fueron evaluados y, si cumplían con los criterios de inclusión establecidos, se integraron al corpus final de revisión. Esta estrategia permitió ampliar el alcance de la búsqueda y explorar literatura que pudo haber quedado fuera por las limitaciones de los descriptores o de los filtros aplicados en las bases tradicionales.

Finalmente, se diseñaron flujogramas basados en la metodología prisma (*Imágenes 4, 5, 6*) (*anexo 10*) para representar visualmente el proceso de selección y depuración. Durante todo el proceso, se utilizó el gestor bibliográfico Mendeley para la organización de las referencias y la anotación de su relevancia.

La búsqueda correspondiente al primer eje temático, anatomía de la laringe, arrojó un total de 302 artículos, distribuidos en las cuatro bases de datos seleccionadas: PubMed (n=154), ScienceDirect (n=59), Ovid Medline (n=50) y LILACS (n=39). A esta recopilación inicial se sumaron 15 artículos obtenidos mediante rastreo de referencias bibliográficas y por herramientas de inteligencia artificial (Elicit y Paper Connect), que permitieron incorporar documentos relevantes tras formular preguntas orientadas a los ejes temáticos y subir artículos base. Asimismo, se incluyeron 4 libros de referencia comúnmente utilizados en la práctica y enseñanza de la anatomía.

La lista total de documentos fue depurada para eliminar duplicados, contrastando los resultados entre las bases de datos, el rastreo de referencias y las sugerencias de IA. Tras una revisión manual de títulos y resúmenes, se seleccionaron 39 documentos (35 artículos y 4 libros) que cumplieron con los criterios establecidos, centrados específicamente en la descripción anatómica

de la laringe y sus cartílagos. Este conjunto documental constituye la base sobre la cual se sustenta el análisis anatómico realizado en esta investigación, proporcionando un marco sólido para su caracterización estructural.

Criterios de exclusión de literatura para Anatomía de la Laringe:

- Estudios sobre anatomía animal.
- Descripciones de estructuras adyacentes, como la glándula tiroides.
- Investigaciones relacionadas con enfermedades tiroideas.
- Publicaciones que no abordaran específicamente la anatomía laríngea.
- Artículos centrados exclusivamente en técnicas quirúrgicas o estudios histológicos.

Los hallazgos preliminares identificaron variantes anatómicas que, en muchos casos, suelen ser ignoradas o confundidas con patologías. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de desarrollar caracterizaciones anatómicas específicas, que contribuyan a una mayor precisión en las intervenciones clínicas y quirúrgicas.

La búsqueda correspondiente al segundo eje temático, morfometría laríngea, arrojó un total de 302 artículos, distribuidos en las cuatro bases de datos seleccionadas: PubMed (n=185), ScienceDirect (n=0), Ovid Medline (n=18) y LILACS (n=5). A esta recopilación inicial se sumaron 55 artículos obtenidos mediante rastreo de referencias bibliográficas y por herramientas de inteligencia artificial (Elicit y Paper Connect), que permitieron incorporar documentos relevantes tras formular preguntas orientadas a los ejes temáticos y subir artículos base.

La lista total de documentos fue depurada para eliminar duplicados, contrastando los resultados entre las bases de datos, el rastreo de referencias y las sugerencias de IA. Tras una revisión manual de títulos y resúmenes, se seleccionaron 83 artículos que cumplieron con los criterios establecidos, centrados específicamente en la descripción morfométrica de la laringe y sus cartílagos.

Criterios de exclusión de literatura para Morfometría Laríngea:

- Morfometría laríngea animal.
- Morfometría de estructuras que no contemplen los cartílagos laríngeos.

Los hallazgos preliminares evidenciaron una variabilidad morfológica considerable en los cartílagos laríngeos entre distintos grupos poblacionales, destacando diferencias según el sexo, la edad y el origen étnico.

La búsqueda correspondiente al tercer eje temático, modelado 3D de laringe o cartílagos laríngeos, arrojó un total de 302 artículos, distribuidos en las cuatro bases de datos seleccionadas: PubMed (n=14), ScienceDirect (n=34), Ovid Medline (n=27) y LILACS (n=2). A esta recopilación inicial se sumaron 4 artículos obtenidos mediante rastreo de referencias bibliográficas y por herramientas de inteligencia artificial (Elicit y Paper Connect), las cuales permitieron incorporar documentos relevantes tras formular preguntas orientadas a los ejes temáticos y subir artículos base.

La lista total de documentos fue depurada para eliminar duplicados, contrastando los resultados entre las bases de datos, el rastreo de referencias y las sugerencias de IA. Tras una revisión manual de títulos y resúmenes, se seleccionaron 23 artículos que cumplieron con los criterios establecidos, centrados específicamente en el desarrollo de modelos anatómicos de la laringe y sus cartílagos.

Criterios de exclusión de literatura para Modelado 3D:

- Emulación de estructuras que no contemplen la laringe.

Los hallazgos preliminares evidenciaron una línea de investigación inminente con un creciente interés en el desarrollo de modelos anatómicos de las estructuras laríngeas para el aprendizaje, la enseñanza y el entrenamiento quirúrgico.

5.8.2.2. Acercamiento a especímenes laríngeos – Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle

Durante esta fase, se llevó a cabo la identificación y selección inicial de las muestras laríngeas disponibles en el Laboratorio de Anatomía Humana de la Universidad del Valle. Esta actividad permitió contrastar la información teórica con la anatomía real de los especímenes biológicos, además de identificar estructuras musculares, membranas y nervios asociados a los cartílagos laríngeos. Al finalizar esta actividad el objetivo es obtener el protocolo operativo de disección de cartílagos laríngeo.

Al realizar el inventario de las muestras aptas, se encontró que las laringes provenían principalmente de cadáveres disecados con fines académicos, conservados mediante técnicas tradicionales de inmersión en formol y soluciones fijadoras. Los especímenes examinados se encontraban tanto dentro de cadáveres completos en el anfiteatro (Imagen 1), como de forma aislada (Imagen 2), ya fuera conservados en solución chilena modificada o almacenados en recipientes plásticos tras su fijación. La *Tabla 3* muestra los especímenes disponibles y la procedencia de los mismos

La manipulación de los especímenes de este laboratorio contempla para la fijación y mantenimiento de especímenes una solución que contine formol y agua destilada, para los cadáveres, se realiza el embalsamamiento cuando son recibidos por el laboratorio con una solución que contiene formol, agua, y cloruro de sodio y para su mantenimiento una formula conocida como solución chilena (98) con breves modificaciones; alcohol etílico al 70 %, glicerina (15%), trementina, cloruro de benzalconio , nitrato de potasio y agua. Las muestras contaban con aproximadamente diez años de conservación. Algunas presentaban cortes sagitales posteriores, mientras que otras estaban completamente disecadas, lo cual influyó en su idoneidad para el estudio.

Se priorizó la elección de aquellas laringes que conservaran la mayor integridad anatómica de sus cartílagos y tejidos adyacentes. Particularmente, se observaron laringes con cortes a nivel de la lámina del cartílago cricoides, esta condición imposibilita la obtención de datos morfométricos completos y fiables, debido a la pérdida de integridad estructural de dichos elementos.

Adicionalmente, el Laboratorio de Anatomía recibió en donación cuatro laringes provenientes del Instituto de Medicina Legal (Imagen 3), en el marco de un convenio interinstitucional. Estas muestras, extraídas de cadáveres en estado fresco, se entregaron ya sea en bloques respiratorios o de forma aislada, y fueron sometidas a conservación inmediata bajo supervisión institucional. Su adecuado estado de preservación favoreció la conservación de los relieves anatómicos finos



Imagen 1 Cadáver disponible en anfiteatro con espécimen de laringe anclada

y permitió una manipulación cuidadosa que mantuvo la integridad de los cartílagos laríngeos, contribuyendo así a una muestra más representativa y adecuada para el estudio.

En total, se dispuso de seis (6) muestras iniciales, entre las disponibles en el laboratorio y las donadas por el Instituto de Medicina Legal. Con apoyo de la laboratorista del anfiteatro, se procedió a anonimizar los datos personales de los donantes, conservando únicamente la edad (cuando se conozca) y el sexo, para el análisis investigativo.

Cada muestra anatómica fue codificada considerando tres variables:

- Número natural positivo que identifica el orden de uso de la muestra (escala nominal).
- Letra M o F, según el sexo (escala nominal).
- Edad del donante al fallecer (escala ordinal).

En caso de no conocer uno de los datos se asigna dentro del código las letras xx.

Estos datos se registraron en una ficha de acrílico de 2 cm × 2 cm, siguiendo el orden indicado y separados por puntos. Por ejemplo: 1.M.14 corresponde a la primera muestra utilizada, de un hombre de 14 años

Dado el estado de conservación variable, se implementaron estrategias de restauración y preservación para mantener la integridad anatómica de los cartílagos laríngeos. Se desarrolló una fase piloto de disección con un espécimen, lo que permitió validar técnicas y elaborar Procedimientos Operativos Estandarizados (POE), como el de disección, e informes técnicos. Estas actividades formativas en habilidades de restauración, conservación y disección fueron supervisadas por profesionales expertos, en el marco de la asignatura Técnicas de Anatomía I (código 604041), cursada en el primer semestre de 2024.

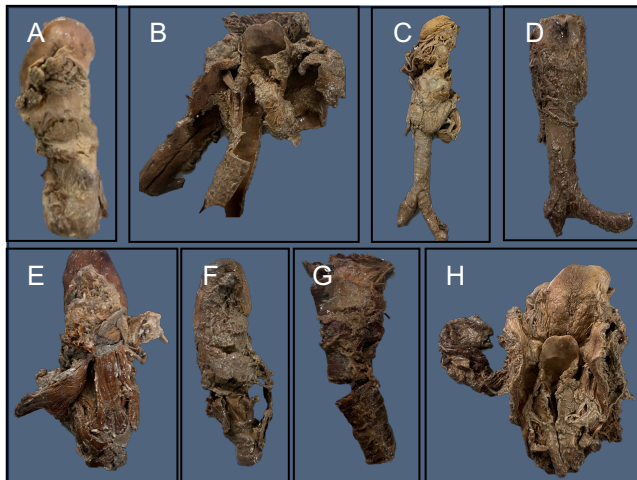


Imagen 2 Estado de laringes disponibles en el anfiteatro de la universidad del Valle. A. laringe con lengua. B. laringe con corte posterior (no apta para el estudio). C. laringe con tráquea lengua, tiroides y tejido nervioso. D. laringe con tráquea con corte de epiglotis (no apta). E laringe con lengua con agente fungicida en tejido muscular. F. laringe con cartílagos fracturados (no apta). G. laringe con tráquea con cartílagos fracturados (no apta). H. laringe con lengua y cartílagos intactos con corte posterior (no apta)

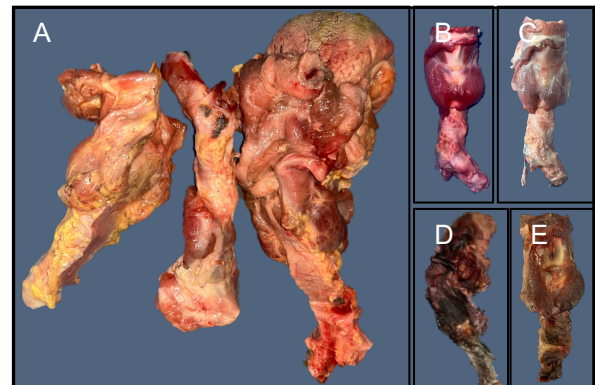


Imagen 3 A. laringes donadas por medicina legal. B. laringe 1.M.14 con órgano lingual y graso extirpado. C. laringe 1.M.14 después de 12 horas sin conservación. D-E. laringes 1.M.14 y 2.M.50 conservadas a 4° centígrados

Espécimen	Procedencia / Condición
1.M.14	Donación de medicina legal al anfiteatro del Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle. Utilizada en el proyecto para análisis morfométrico y escaneo 3D
2.M.50	Donación de medicina legal al anfiteatro del Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle. Utilizada en el proyecto para análisis morfométrico y escaneo 3D
3.M.90	Donación de medicina legal al anfiteatro del Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle. Utilizada en el proyecto para análisis morfométrico y escaneo 3D
4.F.17	Donación de medicina legal al anfiteatro del Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle. Utilizada en el proyecto para análisis morfométrico y escaneo 3D
5.M.xx	Disponible en Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle. Utilizada en el proyecto para describir variantes anatómicas
6.M.xx	Disponible en Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle. Utilizada en el proyecto para describir variantes anatómicas
7.M.xx	Disponible en Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle, retirada de cadáver. No utilizada en el proyecto
8.M.xx	Disponible en Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle, retirada de cadáver. No utilizada en el proyecto
9.M.xx	Disponible en Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle, retirada de cadáver. No utilizada en el proyecto
10.M.xx	Disponible en Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle, retirada de cadáver. No utilizada en el proyecto
11.F.xx	Disponible en Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle, retirada de cadáver. No utilizada en el proyecto
12.F.xx	Disponible en Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle, retirada de cadáver. No utilizada en el proyecto

Tabla 3. Inventario de laringes disponibles a utilizar en el proyecto

5.8.2.2.1. Técnicas de recuperación y conservación

Los cuerpos y muestras presentaban signos de desecación, pérdida de color y degradación tisular debido al uso prolongado en docencia. Se investigaron técnicas de recuperación de tejidos blandos para facilitar la disección de las estructuras que recubren los cartílagos laríngeos. En la *Imagen 4A* y *4C* se presenta la manipulación y conservación de los especímenes. También como se trabajó con especímenes frescos provenientes de Medicina Legal, los cuales debían ser manipulados cuidadosamente para conservar su integridad física *Imagen 4B*. Se identificaron métodos para preservar la humedad, el color y la elasticidad, lo que dio lugar a un informe técnico sobre técnicas aplicables a este tipo de material biológico (*Anexo 6*).



Imagen 4 Manipulación de especímenes laríngeos. A. Elaboración de soluciones para conservar especímenes. B Manipulación de especímenes. C. Conservación de especímenes laríngeos en Formal

5.8.3. *Elaboración y validación de POE de disección de laringe*

Con las muestras restauradas y conservadas, se realizaron disecciones piloto orientadas a la obtención de cartílagos laríngeos. Estas experiencias permitieron la cualificación técnica del investigador principal, la identificación de puntos anatómicos clave y el establecimiento de un procedimiento adecuado para la extracción laríngea.

Se revisaron guías de disección cervical, incluyendo la elaborada por la profesora Elizabeth Peña y documentos internos del Departamento de Morfología. Seguido de esto y dada la complejidad del área anatómica, se desarrolló un protocolo específico para la desarticulación cuidadosa de los cartílagos laríngeos, con base en el estado del arte y los objetivos del estudio. Este documento (*Anexo 1*) detalla los requerimientos técnicos para separar cada cartílago sin comprometer su integridad estructural. Fue validado durante las disecciones piloto y se empleará para los procedimientos en la siguiente fase.

En febrero de 2024, el investigador principal, con apoyo del coinvestigador Alejandro Rodríguez, realizó la primera disección laríngea (prueba piloto), previa a la aplicación de técnicas de conservación o restauración. Se utilizó un kit básico compuesto por bisturí No. 3 o 4 con hojas intercambiables, portaagujas tipo Mayo, pinzas Kelly (recta y curva), pinzas mosquito, pinzas de disección con y sin garra, pinza Metzembaum recta, sonda acanalada e indicador (*Imagen 5B*). En el *anexo 4* muestra la ficha técnica de las herramientas empleadas.

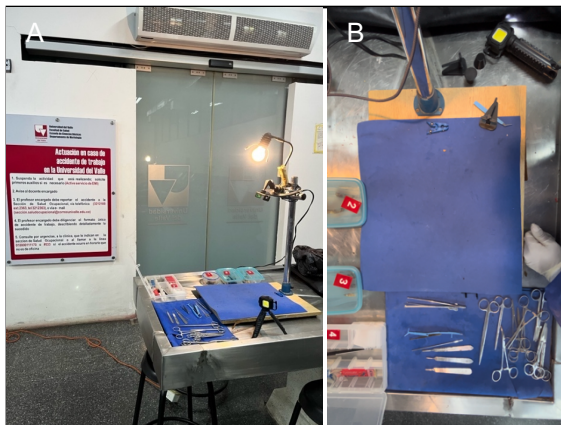


Imagen 5 Espacio de disección y mesa de trabajo para disección. B. Kit de instrumental de disección básico utilizado

La actividad se desarrolló bajo las normas de bioseguridad del laboratorio, incluyendo uso de gorro, gafas, tapabocas, bata de manga larga y calzado cerrado. La prueba piloto evidenció la necesidad de emplear instrumentos de pequeña escala para regiones articulares o de difícil acceso. La disección duró cuatro horas y se centró en la remoción de tejido muscular adyacente, sin desarticulación completa de los cartílagos. Durante esta intervención, se identificaron referencias anatómicas clave, como la prominencia laríngea y los bordes superior e inferior de los cartílagos tiroideos y cricoides.

Se presentaron limitaciones técnicas, como la presencia de tejido conectivo y pericondrial que dificultaban la delimitación cartilaginosa. Esto motivó el uso de una lámpara lupa con luz fría y un microscopio estereoscópico (*Imagen 6*), que mejoraron la visualización de las transiciones tisulares y facilitaron la disección pericondrial.

La lámpara lupa proporcionó un acercamiento ampliado con buena iluminación y maniobrabilidad, mientras que el microscopio estereoscópico ofreció visión tridimensional con aumento controlado, lo cual fue clave para la disección de cartílagos pequeños, como los aritenoides, y para la toma de fotografías de alta resolución (*Imagen 7*).

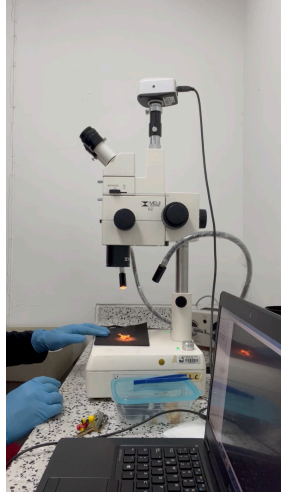


Imagen 6 Microscopio estereotáxico Meiji Techno 20-70x del laboratorio de histología de postgrado, visualizando cartílago epiglótico

El uso complementario de ambos instrumentos permitió una mejor identificación de los planos anatómicos y la ejecución de cortes precisos sin comprometer la morfología de los cartílagos. Además, durante la fase de restauración posibilitaron una evaluación más detallada del estado de conservación, detectando fisuras o calcificaciones que podrían haber pasado desapercibidas a simple vista.

La validación del protocolo fue inicialmente cualitativa, observando la calidad del espécimen obtenido. Posteriormente, esta se complementó con la validación del POE de medición morfométrica, que ancla la calidad de la disección con la fidelidad de las medidas obtenidas.

Como resultado de esta actividad, se adecuó un espacio específico para las disecciones, con mesa de trabajo sobre fondo azul para facilitar la captura de imágenes y video desde vista superior. Además, se integraron soportes móviles con iluminación directa sobre el espécimen (*Imagen 5A*).

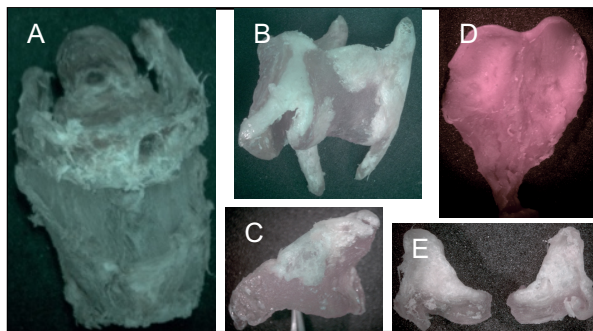


Imagen 7 Imágenes obtenidas por microscopio estereotáxico. A. Laringe M.2.50 articulada. B. Cartílago tiroideo. C. Cartílago cricoides. D. Cartílago epiglótico. E. Cartílagos aritenoides

Después de trabajar las diferentes habilidades técnicas, fue necesario establecer cuáles eran los especímenes y las muestras a analizar. Se concluyó que las muestras que presentaban un tiempo prolongado de conservación en la universidad, a pesar de contar con su estructura intacta, mostraban debilidad en sus tejidos, lo que provocaba que, al momento de realizar el proceso de disección, estas se fracturaran o comenzaran a deformarse, lo cual influiría directamente en la preservación de la forma

Esto concuerda con lo establecido por Fayoux et al. (2008) (79) en el que establece que el uso de muestras frescas permite la preservación de las características fisicoquímicas de las estructuras cartilaginosas necesarias para obtener una evaluación similar a las condiciones fisiológicas. En los especímenes conservados, debido a la contracción del tejido, las mediciones se modifican o son imposibles de realizar. Por tal motivo, las muestras definitivas fueron los especímenes laríngeos donados por Medicina Legal, de los cuales se analizaron los dos cartílagos principales más grandes: el cartílago tiroideo y el cartílago cricoides. Durante los siguientes doce meses, se disecaron cuatro laringes humanas, aplicando los protocolos diseñados.

Cada procedimiento de disección se estructuró en dos fases:

- Remoción cuidadosa de tejidos musculares y nerviosos adyacentes, sin desarticular los cartílagos.
- Extracción completa e íntegra de los cartílagos seleccionados para el análisis morfométrico.

Las actividades y manipulación de las diferentes muestras utilizadas en el presente proyecto se describe en el apartado de Disección de especímenes laríngeos de la fase III

5.8.3.1. Acercamiento a instrumentos para modelado 3D – Laboratorio de Fabricación Digital

En paralelo al proceso de disección y recuperación de especímenes, el investigador principal llevó a cabo una fase de exploración en el Laboratorio de Fabricación Digital de la Universidad del Valle. El propósito de esta actividad fue identificar y seleccionar las herramientas tecnológicas más adecuadas para el modelado e impresión tridimensional de los cartílagos laríngeos. Esta exploración permitió reconocer el potencial de diversos dispositivos de escaneo, impresión y software relacionados con el laminado y postprocesamiento en términos de su capacidad para representar con fidelidad la morfología anatómica observada durante las disecciones.

La evaluación se centró en identificar instrumentos con alta resolución de escaneo, precisión de impresión y compatibilidad con software especializado en morfometría anatómica. Se contó con la asesoría del personal técnico del laboratorio, quienes ofrecieron orientación sobre el uso, mantenimiento y calibración de los equipos, así como sobre los parámetros óptimos para la digitalización de estructuras anatómicas de pequeño tamaño.

Durante esta fase, se revisaron los principales equipos disponibles en el laboratorio, entre ellos el escáner EinScan Pro HD, impresoras 3D de resina y filamento, estaciones de curado UV, y computadores de alto rendimiento equipados con programas de edición y análisis tridimensional (ver ficha técnica de equipos *anexo 4*). Esta exploración permitió establecer criterios preliminares para la selección de tecnologías aplicables a las características morfológicas y físicas de los especímenes disecados.

Los hallazgos obtenidos resultaron fundamentales para la implementación efectiva del escaneo 3D de los especímenes seleccionados y desarrollar el debido protocolo de escaneo, así como para la posterior etapa de análisis morfométrico comparativo y validación anatómica de los modelos obtenidos.

5.8.3.1.1. Evaluación técnica del escáner EinScan Pro HD

Como parte del acercamiento inicial al proceso de escaneo, se realizó una revisión detallada del escáner EinScan Pro HD, disponible en el Laboratorio de Fabricación Digital de la Universidad del Valle. Este equipo fue seleccionado por su alta resolución, portabilidad y compatibilidad con software de procesamiento y análisis morfométrico, características esenciales para la digitalización de estructuras anatómicas complejas.

El escáner opera mediante tecnología de luz estructurada LED blanca, proyectando patrones sobre el objeto para capturar su geometría con una precisión de ± 0.04 mm y una resolución de hasta 0.2 mm. Ofrece tres modos de escaneo (manual HD, rápido y fijo), cubre un rango de hasta 310 x 240 mm, y mantiene una distancia de trabajo óptima de 510 mm. Su velocidad alcanza los 3 millones de puntos por segundo y genera archivos en formatos OBJ, STL y PLY, compatibles con programas como SolidEdge, Geomagic y Meshmixer. Utiliza el software EXScan Pro para control y postprocesamiento, y requiere un sistema Windows 10 o superior con tarjeta gráfica

NVIDIA GTX/RTX. Su peso de 1.13 kg y conexión USB 3.0 lo hacen portátil y eficiente para tareas de escaneo biomédico. El manual de funcionamiento y detalles técnicos adicionales se encuentran en el *Anexo 4*.

El funcionamiento del escáner se basa en la adquisición de superficies tridimensionales mediante luz estructurada: un proyector emite patrones de luz blanca que se distorsionan sobre el objeto, y dos cámaras registran dicha distorsión. Mediante triangulación, el software reconstruye la forma digital del objeto. Adicionalmente, el equipo puede complementarse con un paquete industrial que incluye una mesa giratoria y un trípode, lo que facilita el escaneo en modo fijo. Durante el proceso, el software generó una nube de puntos que representaba la geometría del objeto; posteriormente, esta se convirtió en una superficie continua mediante la función de "enmallado", con opciones para generar modelos detallados, simplificados o sólidos.

5.8.3.1.2. Proceso de calibración de escáner

Para garantizar la precisión y confiabilidad del escáner EinScan Pro HD, se realiza un proceso de calibración cada vez que se instala o se modifica el entorno de trabajo. Este proceso utiliza una tarjeta de calibración (calibration board) que presenta una matriz de puntos asimétrica, diseñada específicamente para evaluar la respuesta geométrica del equipo.

La calibración se compone de cinco pasos en los que la tarjeta debe colocarse en distintas posiciones frente al escáner, siguiendo distancias específicas: 560 mm, 530 mm, 500 mm, 470 mm y 430 mm. El escáner debe sostenerse de forma firme y moverse de arriba hacia abajo en varias orientaciones para asegurar la correcta detección de patrones. *La Imagen 8* ilustra las diferentes posiciones de la tarjeta durante el proceso de calibración. En el anexo 4 se detallan los pasos específicos del proceso de calibración

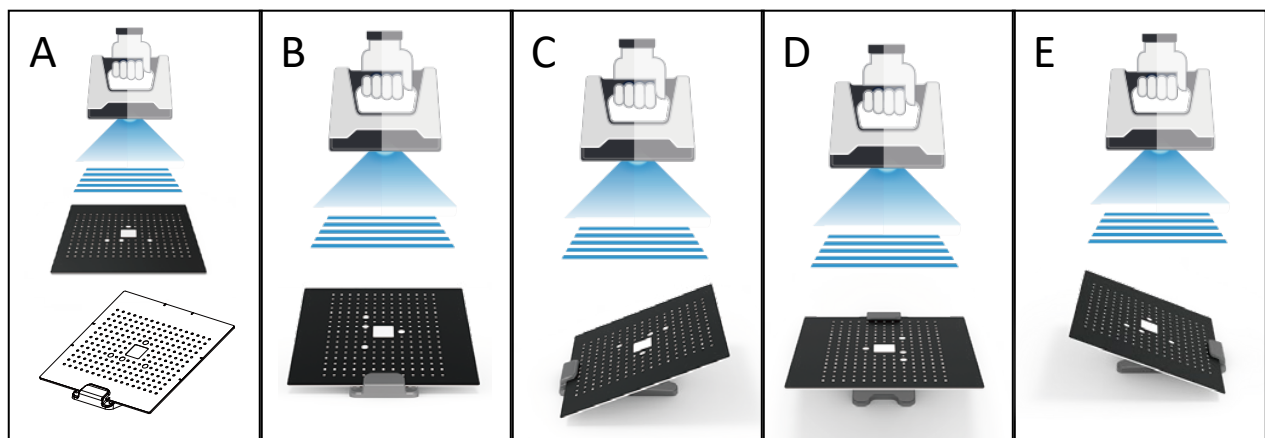


Imagen 8 Proceso de calibración del escáner EinScan Pro HD. A. Paso 1. B. Paso 2. C. Paso 3. D. Paso 4. E. Paso 5

Cada paso busca verificar la alineación precisa entre el sistema óptico del escáner y las coordenadas físicas del espacio. Al finalizar, el software confirma si la calibración ha sido exitosa. De no ser así, se repite el proceso hasta alcanzar los parámetros de exactitud requeridos.

Además de la calibración geométrica, el escáner ofrece una opción para verificar la precisión de escaneo en tiempo real (*Imagen 9C*), lo cual se puede complementar con pruebas externas de validación utilizando objetos de dimensiones conocidas.

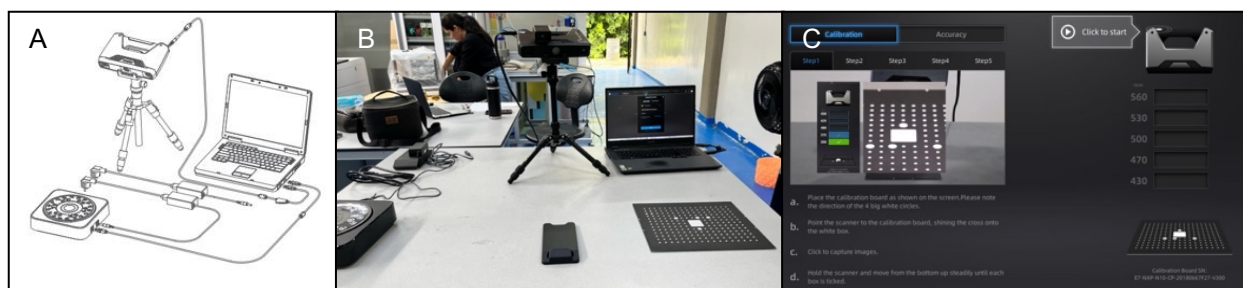


Imagen 9 Disposición del escáner y guía de calibración en software EIScan

Como resultado de esta actividad, se definió un protocolo preliminar de escaneo 3D para cartílagos laríngeos disecados. Este incluye las etapas de preparación del escáner (*Imágenes 9A y 9B*) preparación del espécimen, configuración del escaneo, reconstrucción de malla y postprocesamiento digital.

5.8.3.1.3. **Diseño y fabricación de soportes anatómicos**

Durante la fase de escaneo 3D de cartílagos laríngeos humanos articulados, se identificó la necesidad de fabricar un sistema de soporte específico que permitiera mantener la anatomía de la laringe en una posición estable, sin interferir con el campo de visión del escáner y sin deformar su disposición natural (*Imagen 10A y 10B*).

Todos los diseños tridimensionales, como los soportes de los cartílagos laríngeos, así como los modelos 3d de los cartílagos escaneados se encuentran disponibles en el *anexo 8* en formato .stl.

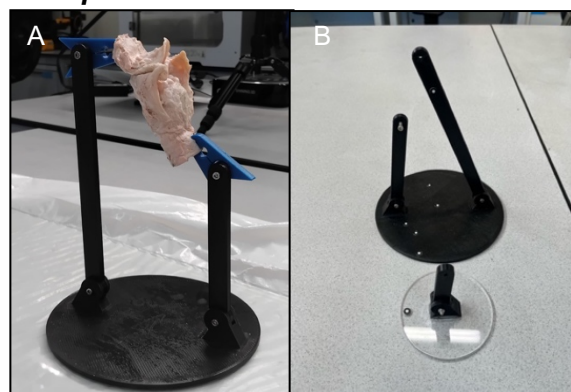


Imagen 10 Soportes anatómicos para laringe articulada

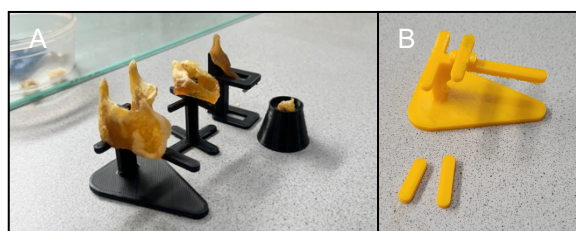


Imagen 11 Soportes para cartílagos desarticulados A. Soporte para los cuatro cartílagos desarticulados. B. Soporte de cartílago tiroides que permite mantener el ancho del cartílago

Se diseñaron soportes modulares que permitieran una correcta sujeción, además de su transporte y preservación segura (*Imágenes 11A y 11B*). El objetivo fue conservar la integridad estructural de cada pieza anatómica y facilitar su uso durante etapas posteriores del proyecto.

El material utilizado para la impresión de dichos soportes fue ácido polilactico (PLA). Cada soporte fue adaptado a la morfología particular del cartílago correspondiente, asegurando una sujeción precisa y estable. Los diseños fueron realizados en el software Fusion 360 y producidos en el Laboratorio de Fabricación Digital de la Universidad del Valle.

5.8.3.1.4. Prueba piloto de escaneo POE de escaneo de cartílagos laríngeos

En junio de 2024 se realizaron pruebas exploratorias de escaneo tridimensional (*Imagen 12*), empleando como modelo el primer cartílago disecado durante el piloto anatómico 1.M.14. Estas pruebas permitieron establecer condiciones iniciales de escaneo y comprender los desafíos técnicos y biológicos del proceso, como la complejidad morfológica y superficial del tejido biológico.

Durante estas pruebas, se identificaron dificultades relacionadas con el color, la reflectividad y la humedad del tejido.



Imagen 12. Modelo tridimensional de espécimen 1.M.14



Video 1 Cámara control de luz

Para mitigarlas, se implementaron estrategias como el uso de sprays matificantes, ajustes en los parámetros de escaneo, control de la iluminación ambiental (*Video 1*) y diseño de soportes personalizados que estabilizaran los especímenes durante el escaneo.

A partir de esta exploración, se definieron los primeros criterios técnicos para la captura tridimensional, los cuales se incluyeron en el protocolo operativo estandarizado (POE) de escaneo

5.8.3.2. Desarrollo y validación POE de medición de cartílagos laríngeos humanos

La elaboración del protocolo de medición morfométrica de los cartílagos laríngeos fue un proceso riguroso y progresivo, concebido con el propósito de establecer una guía clara, precisa y reproducible que permitiera la recolección de datos cuantitativos confiables sobre características anatómicas específicas. Este protocolo se diseñó antes de iniciar la etapa de medición, con base en una revisión crítica de literatura especializada, la experiencia práctica de los investigadores y una fase piloto de disección anatómica.

En primera instancia, se realizó una revisión sistemática de estudios previos que hubieran llevado a cabo caracterización morfométrica de la laringe o de sus cartílagos constituyentes. Se identificaron investigaciones que utilizaron tanto mediciones directas como técnicas basadas en modelos tridimensionales obtenidos por métodos como tomografía computarizada o resonancia magnética. Se prestó especial atención a los puntos de referencia anatómicos (landmarks), los

segmentos establecidos entre ellos, las unidades de medida utilizadas, los instrumentos empleados y la forma de obtención de los datos. A partir del análisis comparativo de diferentes estudios que se presentan en apartados posteriores artículos, se determinaron puntos de concordancia entre estudios, así como puntos complementarios relevantes para este proyecto.

El desarrollo del protocolo se fundamentó en una revisión de literatura científica relacionada con medición morfométrica, tanto en especímenes físicos como en modelos tridimensionales derivados de imágenes médicas. Asimismo, se consultaron normativas técnicas sobre el uso de instrumentos metrológicos, garantizando la precisión y confiabilidad del procedimiento.

Como fase piloto, tres investigadores aplicaron una primera versión del protocolo sobre dos laringes articuladas (2.M.50 y 3.M.90) y un cartílago cricoides aislado (1.M.14). Se identificaron los landmarks, se establecieron segmentos anatómicos entre estos puntos y se realizaron mediciones directas. Los resultados obtenidos fueron sometidos a análisis estadístico de fiabilidad intraobservador e interobservador utilizando el Software SPSS Stactistic. Esta actividad no buscaba producir resultados definitivos, sino verificar la claridad, la viabilidad técnica y la reproducibilidad del protocolo. Los datos obtenidos se utilizaron para evaluar la consistencia entre evaluadores y ajustar aspectos operativos del protocolo.

Este ejercicio bibliográfico fue complementado por una revisión y profundización anatómica llevada a cabo por los investigadores en la prueba piloto de disección, quienes analizaron directamente especímenes laríngeos disponibles en el Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle. A partir de esta aproximación anatómica práctica, se pudieron identificar y validar puntos antropométricos aplicables, así como definir los segmentos lineales y angulares que serían objeto de medición. Esta experiencia fue reforzada por el piloto de disección que permitió ajustar detalles técnicos del abordaje a los cartílagos y establecer criterios claros para su manipulación.

Como producto de esta fase, se diseñó un protocolo técnico que especifica:

- Los puntos antropométricos de mayor relevancia para cada uno de los cartílagos laríngeos (tiroides, cricoides, aritenoides).
- Los segmentos de medición definidos por la relación entre dichos puntos.
- El tipo de instrumentos de medición a utilizar, tanto para mediciones directas (calibre digital, cinta métrica flexible) como para mediciones en modelos 3D (software de análisis digital).
- La posibilidad de aplicar el protocolo de forma bilateral para captar posibles asimetrías anatómicas.
- La aplicabilidad del protocolo tanto sobre especímenes anatómicos preservados como sobre modelos tridimensionales impresos en 3D, garantizando versatilidad metodológica.

En suma, la estructuración de este protocolo no solo responde a fundamentos teóricos y anatómicos sólidos, sino también a criterios técnicos de precisión, factibilidad y adaptabilidad, esenciales para el estudio morfométrico riguroso de los cartílagos laríngeos en contextos anatómicos y digitales.

5.8.3.2.1. Estandarización y pruebas de fiabilidad

Con el fin de garantizar la consistencia, precisión y reproducibilidad de las mediciones morfométricas propuestas en el protocolo, el grupo de investigación llevo a cabo un riguroso proceso de estandarización. Esta fase busca minimizar sesgos, validar el uso de los instrumentos seleccionados y confirmar que las mediciones puedan ser replicadas bajo condiciones similares

por diferentes evaluadores (fiabilidad interobservador) o por el mismo evaluador en distintos momentos (fiabilidad intraobservador).

Previo a la realización de las pruebas de concordancia, el investigador principal debe contar con la formación teórica y práctica necesaria para ejecutar adecuadamente las mediciones descritas en el protocolo. Para ello, se establece que el investigador haya completado satisfactoriamente el entrenamiento en disección anatómica de laringe humana, seguido por un proceso de entrenamiento intensivo en técnicas de medición física, durante un periodo de tres semanas. Este entrenamiento fue realizado bajo la supervisión directa de los tutores del proyecto, asegurando el dominio de los procedimientos definidos en el Protocolo Operativo Estandarizado (POE) de medición.

5.8.3.2.1.1. Pruebas de fiabilidad intraobservador

Para evaluar la consistencia y estabilidad de las mediciones realizadas por el investigador principal a lo largo del tiempo, se llevaron a cabo pruebas de fiabilidad intraobservador. Una vez finalizado el entrenamiento formal, el investigador realizó la primera serie de mediciones sobre especímenes laríngeos seleccionados. Dos meses después, se repitieron las mediciones en las mismas muestras, asegurando que el investigador no tuviera acceso a los resultados iniciales para evitar sesgos. La selección y preparación de las muestras para esta prueba fueron gestionadas por los coinvestigadores, quienes no proporcionaron detalles específicos sobre el estado de cada espécimen.

Las mediciones se realizaron utilizando un pie de rey digital Mitutoyo 500-197-30. El objetivo era obtener un coeficiente de concordancia superior a 0.80, lo que indicaría una alta fiabilidad intraobservador. Los datos de ambas rondas de medición fueron comparados y analizados estadísticamente mediante el Coeficiente Alfa de Cronbach para evaluar la consistencia interna. Los resultados de las pruebas de fiabilidad intraobservador demuestran una elevada consistencia en las mediciones realizadas por el investigador principal. En los tres especímenes analizados (1.M.14, 2.M.50 y 3.M.90), el Coeficiente Alfa de Cronbach superó consistentemente el valor de 0.99, lo que indica una excelente fiabilidad interna y repetibilidad de las mediciones. Este hallazgo sugiere que el investigador mantuvo una identificación precisa de los puntos anatómicos y aplicó el protocolo de medición de manera estable y uniforme en el tiempo, incluso con un intervalo de dos meses entre las mediciones.

Específicamente, el cartílago cricoides aislado (1.M.14) mostró una concordancia particularmente alta, probablemente debido a la claridad de sus límites anatómicos y la ausencia de estructuras adyacentes que pudieran interferir con la identificación de los landmarks. Las laringes articuladas (2.M.50 y 3.M.90), aunque presentaron algunas variaciones mínimas, mantuvieron rangos aceptables de repetibilidad, validando la estabilidad del protocolo incluso en estructuras más complejas. La consistencia general de los resultados valida tanto el Protocolo Operativo Estandarizado (POE) de medición como el entrenamiento recibido, fortaleciendo la confiabilidad del proceso de recolección de datos morfométricos para fases futuras del estudio.

En el anexo 10 se presentan los resultados detallados por espécimen para esta prueba

5.8.3.2.1.2. Pruebas de fiabilidad interobservador

Con el objetivo de evaluar la consistencia de las mediciones entre diferentes investigadores, se realizó una prueba de fiabilidad interobservador. Esta prueba incluyó al investigador principal y a dos co-investigadores, quienes midieron de forma independiente las mismas muestras utilizando

el protocolo previamente establecido. Los especímenes analizados fueron dos laringes con cartílagos articulados (2.M.50 y 3.M.90) y un cartílago cricoideo aislado (1.M.14). Todas las mediciones se realizaron utilizando un pie de rey digital Mitutoyo 500-197-30 y fueron comparadas y analizadas estadísticamente mediante el Coeficiente Alfa de Cronbach para determinar la concordancia.

Los resultados de las pruebas de fiabilidad interobservador demuestran una elevada concordancia entre los tres investigadores en la aplicación del protocolo de medición morfométrica. El Coeficiente Alfa de Cronbach para los tres especímenes (1.M.14, 2.M.50 y 3.M.90) fue consistentemente superior a 0.93, lo que indica una excelente fiabilidad entre evaluadores. Este hallazgo es crucial, ya que valida la robustez del Protocolo Operativo Estandarizado (POE) de medición y su capacidad para ser replicado por diferentes operadores con resultados consistentes. El cartílago cricoideo aislado (1.M.14) mostró una concordancia particularmente alta, lo cual es atribuible a su morfología más sencilla y a la clara definición de sus puntos de referencia, facilitando una medición precisa por parte de todos los evaluadores. Las laringes articuladas (2.M.50 y 3.M.90) también presentaron una concordancia fuerte.

Para el espécimen 3.M.90, aunque el Alfa de Cronbach para medidas únicas fue de 0.830 (indicando buena fiabilidad individual), y se observaron ligeras variaciones en algunas mediciones específicas, estas no comprometieron la estabilidad general del protocolo.

Las discrepancias podrían atribuirse a diferencias menores en la interpretación de los márgenes anatómicos o sutiles variaciones en la manipulación del espécimen (*Imagen 13*), inherentes a la medición manual de estructuras complejas. No obstante, el alto valor del Alfa de Cronbach para medidas promedio refuerza la robustez del método cuando se considera el conjunto de las evaluaciones. En el anexo 10 se presentan los resultados detallados por espécimen



Imagen 13 Especimen 3.M.90 cartílagos articulados, evidenciando dificultad en identificación de landmarks

5.8.3.2.2. Validación de instrumentos y procedimientos

La validez de las mediciones no solo depende de la consistencia entre observadores, sino también de la precisión intrínseca de los procedimientos e instrumentos utilizados. Durante todo el proceso de estandarización y fiabilidad, se llevó a cabo una evaluación constante del desempeño de cada instrumento, así como de la adecuación de las técnicas de medición tanto directas como digitales. Este análisis permitió documentar fortalezas y limitaciones metodológicas, y establecer los ajustes necesarios para optimizar la calidad de los datos obtenidos.

Una vez completada la resección y limpieza del tejido muscular y mucoso, obteniendo el esqueleto cartilaginoso de cada espécimen, el investigador principal procedió a aplicar el protocolo de medición morfométrica diseñado previamente. Las mediciones directas se realizaron con el apoyo de instrumentos de precisión que incluyen, pie de rey digital, goniómetros y software especializados de medición

Todos los datos obtenidos fueron rigurosamente consignados en el protocolo de medición correspondiente y respaldados por registro fotográfico con una cámara digital.

Este proceso de validación instrumental y procedimental es fundamental para sustentar la aplicabilidad clínica e investigativa del protocolo desarrollado. Al combinar la estandarización, las pruebas de fiabilidad (intra- e interobservador) y la validación metodológica, se establece un marco robusto que garantiza que los datos recolectados sean confiables, precisos y científicamente defendibles. Esto, a su vez, fortalece la credibilidad de los hallazgos y las conclusiones derivadas del estudio.

5.8.4. Fase III Obtención y organización de datos. Disección, escaneo y medición morfométrica en modelos reales y digitales

Esta fase del proyecto se centró en la obtención de datos morfométricos de los cartílagos laríngeos humanos a partir de dos métodos complementarios y comparables: las mediciones directas realizadas sobre los especímenes disecados y las mediciones digitales efectuadas sobre los modelos tridimensionales generados mediante escaneo. Para esto se realizó actividades de disección, actividades de escaneo y actividades de medición. Para esto se utilizaron los protocolos operativos desarrollados en la fase anterior. Los datos obtenidos se organizaron en una matriz Excel. El proceso general de obtención de datos en esta fase se ilustra en la *Imagen 14*. Los datos recopilados en esta etapa fueron comparados con los derivados de las mediciones de la laringe impresa en 3D y analizados en profundidad durante la fase IV del proyecto.

El proceso de obtención de datos se organizó en dos momentos clave:

- Primer momento: Se removieron cuidadosamente los tejidos blandos de las laringes, preservando la integridad y disposición original de los cartílagos laríngeos. Se realizaron las primeras mediciones directas y, posteriormente, se efectuó un escaneo tridimensional de la laringe en su configuración anatómica original (in situ). A partir de las imágenes tridimensionales obtenidas por el escaneo, se tomaron las mediciones digitales pertinentes.
- Segundo momento: Se extrajeron individualmente los cartílagos laríngeos (tiroides y cricoides, según el interés del estudio). Estas estructuras fueron medidas nuevamente de forma directa y escaneadas por separado, obteniendo así modelos digitales de unidades anatómicas aisladas. A estas imágenes tridimensionales también se les tomaron las mediciones digitales correspondientes.

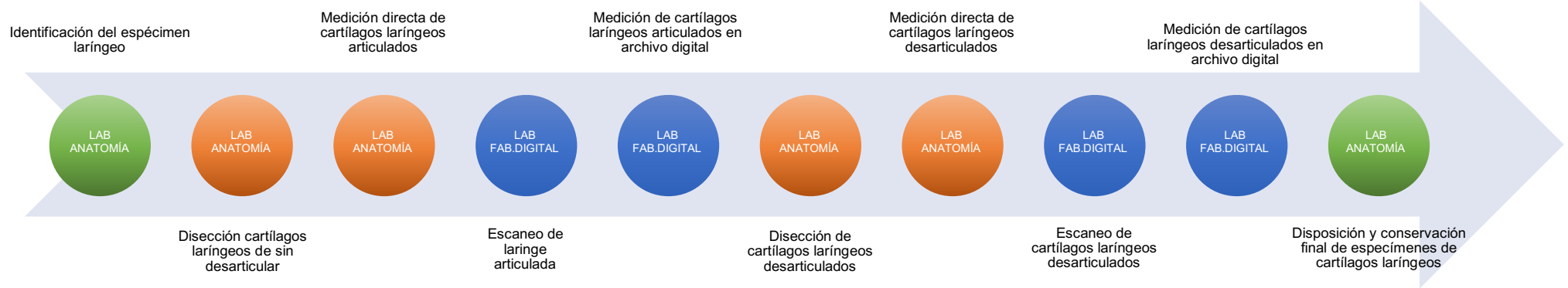


Imagen 14 Flujo de trabajo para la obtención de datos en la Fase III

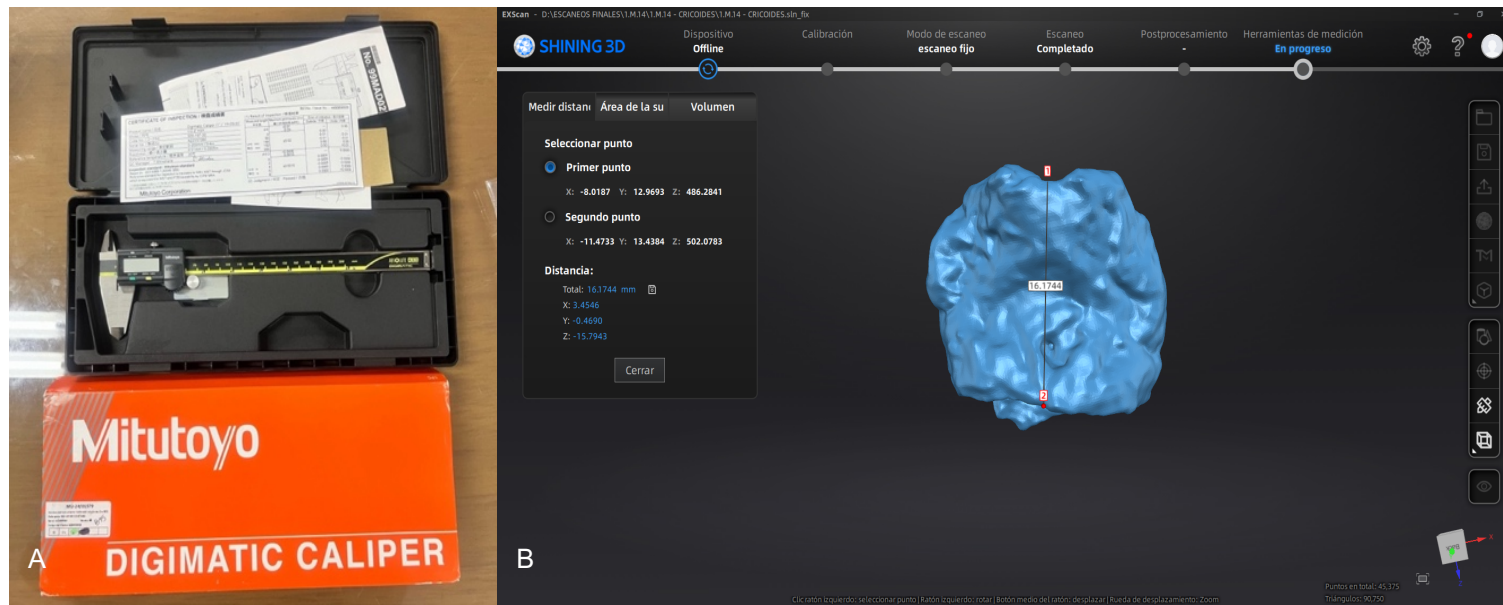


Imagen 15 Instrumentos de medición utilizados en la Fase III. (A) Pie de Rey digital Mitutoyo 500-197-30 (CD-8" ASX). (B) Software EXScan 4.2 para mediciones digitale

El investigador principal, previamente capacitado, llevó a cabo la disección de cuatro laringes humanas, aislando los cartílagos laríngeos de acuerdo con protocolos operativos estandarizados. Este proceso se realizó en el Laboratorio de Anatomía Humana, en espacios acondicionados para la disección y documentación fotográfica. A medida que se obtenían los especímenes disecados, se procedía con el escaneo, siguiendo también protocolos operativos estandarizados. El escaneo se realizó en el Laboratorio de Fabricación Digital, que cuenta con el equipamiento adecuado. Es importante destacar que, aunque en fases piloto se realizaron escaneos y obtuvieron datos de cartílagos articulados completos o de cartílagos epiglóticos y aritenoides, en el presente estudio solo fueron objeto de análisis los cartílagos tiroideos y cricoides de los cuatro especímenes elegidos.

Las mediciones directas se realizaron con un Pie de Rey digital Mitutoyo 500-197-30 (CD-8" ASX), el cual contaba con un certificado de calibración LML.1257-24, emitido por el Laboratorio de Metrología de Equipos y Controles Industriales S.A. (*Imagen 15.A*). Para las mediciones sobre los modelos digitales, se utilizaron las herramientas de análisis del software EXScan 4.2 (*Imagen 15.B*).

Durante esta fase, no se realizó aún la impresión tridimensional de los modelos digitales, ni la medición de estos modelos ya que dicha actividad fue programada para desarrollarse en la Fase IV. De igual forma, el análisis comparativo entre los diferentes tipos de datos (mediciones directas, digitales e impresas en 3D) se efectuará en la Fase V, donde se aplicarán herramientas estadísticas para evaluar la fidelidad de los procesos de digitalización y reproducción.

Finalmente, todos los datos obtenidos en esta fase fueron organizados en bases de datos estructuradas. Estas bases consolidan la información proveniente de las mediciones directas y digitales, y serán integradas con los datos de las impresiones 3D para su análisis comparativo en la Fase V del proyecto, donde se evaluará la fidelidad del modelado y se explorarán las variaciones morfológicas entre las muestras.

5.8.4.1. Disección de especímenes laríngeos.

La disección anatómica de los cartílagos laríngeos se realizó con el objetivo de obtener muestras tanto en estado articulado como aislado. Esta aproximación dual permitió analizar las relaciones espaciales entre las estructuras en su disposición natural y, posteriormente, facilitar un análisis morfométrico detallado de cada cartílago de forma individual.

Los especímenes fueron obtenidos del anfiteatro del Laboratorio de Anatomía de la Universidad del Valle y presentaban distintos estados de conservación. Se seleccionaron exclusivamente seis laringes humanas adultas con cartílagos íntegros, sin fracturas ni deformaciones evidentes. Aquellos especímenes en malas condiciones fueron excluidos o restaurados previamente para garantizar su manipulación adecuada. Se dispuso de la identificación del sexo biológico (1 femeninas y 5 masculinas) y, en cuatro de los seis especímenes, se conocía la edad, con un rango estimado entre 14 y 90 años. Las disecciones se llevaron a cabo de acuerdo con el Protocolo Operativo Estandarizado (POE) de disección de cartílagos laríngeos (*Anexo 1*).

Las disecciones fueron realizadas por el investigador principal, quien retiró meticulosamente el tejido muscular y la mucosa que recubren los cartílagos laríngeos. Para ello, se empleó instrumental de disección convencional y herramientas de micro-disección.

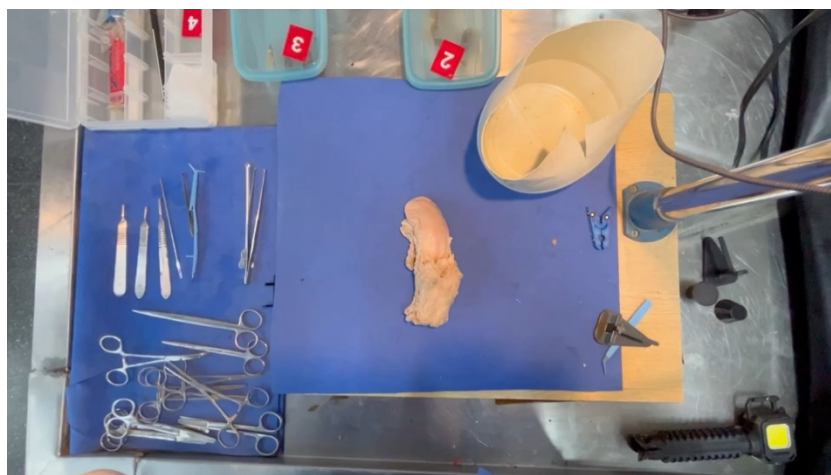
En el anexo 4 se detalla la manipulación de los especímenes finales (cuatro) que sirvieron para hacer el análisis los hallazgos encontrados en los dos especímenes restantes sirvieron para efectos de resultados y discusión

- **Momento 1: Disección para obtener cartílagos laríngeos articulados**

Esta actividad estuvo condicionada por las características anatómicas y el estado de conservación de cada espécimen, como se detalla en el anexo 10.

Inicialmente, se retiraron estructuras adyacentes de mayor tamaño, como la tráquea (mediante una incisión transversal a la altura del segundo cartílago traqueal) y la lengua (mediante un corte a un centímetro por encima del borde superior del hueso hioides). Posteriormente, se resecó el hueso hioides junto con la membrana tirohioidea, realizando un corte transversal entre el borde superior del cartílago tiroides y el borde inferior del hioides, tras identificar el ligamento tirohioideo lateral y verificar la presencia o ausencia de cartílagos triticeos. A continuación, se retiraron los músculos extrínsecos (infrahioideos) desde su inserción proximal.

Se accedió a la cara anterior de la epiglotis mediante la eliminación del tejido adiposo que recubre el ligamento tiroepiglótico. A nivel del cartílago tiroides, se utilizó una técnica de disección subperióstica desde su borde superior lateral con ayuda de una sonda acanalada, procurando conservar las astas superiores, que son particularmente frágiles. La disección del cartílago cricoides también se efectuó mediante técnica subperióstica, prestando especial cuidado al arco anterior. Se retiró la membrana cricotiroidea mediante una incisión lateral, lo cual permitió el acceso a la mucosa subglótica y a los cartílagos traqueales. Desde la cara lateral, se disecaron la lámina y el arco del cricoides hasta alcanzar la base de los aritenoides, conservando sus articulaciones. Los instrumentos y pasos específicos de esta fase se encuentran descritos detalladamente en el POE (*Anexo 1*). Este proceso quedó registrado en el *Video 2*



Video 2 Proceso de disección de laringe hasta cartílagos articulados

- **Momento 2: Disección para obtener cartílagos laríngeos aislados**

Una vez escaneados los cartílagos articulados y registradas las mediciones morfométricas iniciales, se procedió a la desarticulación de las estructuras laríngeas.

Se inició con la articulación cricotiroidea, separando cuidadosamente las astas inferiores del cartílago tiroides y los ligamentos de soporte. Desde la cara posterior, se retiró la mucosa de

los aritenoides y se disecó la articulación cricoaritenoides mediante técnica subperióstica. El cartílago cricoides fue limpiado retirando el tejido conectivo adherido. Posteriormente, se desarticuló la epiglotis del cartílago tiroides, identificando la comisura anterior y realizando cortes superior e inferior para separar la epiglotis de los pliegues vestibulares, mucosa y membrana cuadrangular. Se continuó con cortes laterales hasta alcanzar el tallo epiglótico, obteniendo el cartílago completamente aislado. Finalmente, se limpió el cartílago aritenoides mediante disección subperióstica y retiro cuidadoso de tejido residual.

5.8.4.2. Escaneo de especímenes

La creación de los modelos tridimensionales de los cartílagos laríngeos se llevó a cabo utilizando los especímenes previamente disecados como punto de partida. Este proceso permitió capturar su geometría tridimensional en modelos virtuales, lo cual fue esencial para la emulación precisa y la posterior caracterización y modelado de estas estructuras.

Para ello, se utilizó el escáner 3D Shining 3D EinScan Pro 2X & HD Series, disponible en el Laboratorio de Fabricación Digital de la Universidad del Valle. El investigador principal contó con el acompañamiento técnico del personal especializado del laboratorio para ejecutar esta fase. Asimismo, se elaboró un Protocolo Operativo Estandarizado (POE) específico para la toma de escaneos 3D, que definió las condiciones de iluminación, la distancia, los parámetros del escáner y la posición de las muestras.

El objetivo principal fue escanear los cuatro cartílagos laríngeos principales: tiroides, cricoides, aritenoides y epiglótico de cada espécimen. Sin embargo, el estado de conservación de algunos cartílagos tras la disección condicionó la posibilidad de escanearlos todos. Dado que se trabajó con cuatro especímenes laríngeos, se obtuvo un total de 16 modelos digitales (anexo 8), sin contar los cartílagos aritenoides de los especímenes. Sin embargo a la dificultad y consistencia en las mediciones solo se analizaron los modelos tridimensionales de los cartílagos tiroides y cricoides. Esta actividad se dividió en dos fases temporales:

- Momento 1: Escaneo de cartílagos articulados. Se realizaron los escaneos con los cartílagos en su configuración articulada.
- Momento 2: Escaneo de cartílagos desarticulados. Se llevó a cabo el escaneo con los cartílagos desarticulados correspondientes a los cuatro especímenes, logrando una mayor visibilidad de superficies internas y contornos anatómicos.

La duración total de esta actividad fue de aproximadamente dos meses, incluyendo la preparación de los especímenes, la toma de escaneos y la verificación de calidad de los archivos generados.

5.8.4.2.1. Postprocesamiento

El escáner EinScan Pro 2X & HD Series inicialmente captura la forma de los objetos mediante la reconstrucción de miles de puntos, almacenándolos en un formato propio del escáner (.sln_fix). El primer paso del postprocesamiento consistió en convertir estas nubes de puntos en una malla tridimensional utilizando el software del escáner EXScan 4.0. Para ello, se configuró el escáner para establecer el número de tomas de acuerdo con el POE y luego se procedió a realizar la optimización global, que permitió el enmallado final.

No se aplicaron filtros de limpieza que buscara eliminar ruidos, artefactos o superficies incompletas, ya que el seguimiento adecuado del protocolo de disección permitiría obtener modelos que tuvieran garantía de su integridad geométrica.

Por lo tanto, se realizó inmediatamente el enmallado de alta resolución con los parámetros definidos previamente en el POE. El archivo resultante, en formato .stl, fue verificado visualmente para comprobar la continuidad de la superficie, la ausencia de huecos y la representación fiel de los detalles anatómicos. Estos modelos ya procesados fueron almacenados para su posterior uso en la actividad de medición sobre modelos digitales y su posterior impresión en la fase IV.

5.8.4.3. Medición de cartílagos laríngeos

La obtención de los datos morfométricos se llevó a cabo mediante dos metodologías complementarias: la medición directa sobre los especímenes cadavéricos disecados y la medición digital sobre los modelos tridimensionales obtenidos del escaneo.

5.8.4.3.1. Medición directa de especímenes laríngeos

Para la medición directa de los cartílagos laríngeos, se empleó un Pie de Rey Digital Mitutoyo 500-197-30 (CD-8" ASX), el cual contaba con un certificado de calibración LML.1257-24, emitido por el Laboratorio de Metrología de Equipos y Controles Industriales S.A. el 24 de julio de 2024. Se aplicó rigurosamente el Protocolo Operativo Estandarizado (POE) desarrollado previamente, con el fin de identificar con precisión los puntos de referencia anatómicos (landmarks), definir las relaciones morfométricas entre ellos, determinar los instrumentos adecuados y estandarizar su uso.

Las actividades de medición directa se desarrollaron en dos momentos clave:

- Momento 1: Medición de cartílagos laríngeos articulados. Durante esta fase, se realizaron mediciones directas sobre 3 de los 4 especímenes laríngeos disponibles. El espécimen 1.M.14 fue reservado como modelo piloto para pruebas iniciales del protocolo, por lo cual no se tomaron mediciones en su estado articulado. Las mediciones incluyeron variables lineales y segmentarias previamente definidas en el POE. En total, se obtuvieron 21 mediciones en esta etapa, la cual tuvo una duración aproximada de dos meses, considerando los tiempos de preparación y registro de cada espécimen
- Momento 2: En esta segunda fase, se procedió a medir cada cartílago laríngeo de forma aislada, después de su desarticulación completa. Se evaluaron los **cuatro** especímenes, incluyendo el 1.M.14, ya que su uso como piloto en la fase anterior no impidió su participación en la etapa de medición individual de cartílagos. Esta estrategia permitió una evaluación más detallada de las estructuras anatómicas y de sus puntos de referencia sin la interferencia de otras estructuras adyacentes. En total, se obtuvieron 666 mediciones en esta fase, que tuvo una duración aproximada de cuatro meses, debido al mayor nivel de detalle requerido en la identificación y medición de los puntos anatómicos de cada cartílago aislado.

Sin embargo, es importante aclarar que solo se tuvieron en cuenta las mediciones del cartílago tiroideos y cricoides de los especímenes, las cuales fueron 51 por espécimen, realizando tres mediciones por espécimen para un total de 153 mediciones por espécimen, sumando 612 mediciones en total para estos cartílagos.

Las mediciones que se realizaron y no fueron tenidas en cuenta corresponde a las de los cartílagos aritenoides y epiglótico del espécimen 1.M.14 y 2.M.50, las del cartílago epiglótico del

especímen 3.M.90 y las de los aritenoides del espécimen 4.F.17. Esta variabilidad y falta de consistencia entre las mediciones de los especímenes hizo que solo se analizaran los cartílagos tiroides y cricoides, de los cuales sí se tenían datos completos para todos los especímenes. La dificultad en realizar la medición en todos los especímenes se debe a dificultades técnicas encontradas al momento de la disección, lo cual impidió la medición de todos los cartílagos en todas las muestras.



Imagen 16 Medición directa sobre espécimen 1.M.14 con cartílagos articulados



Imagen 17 Medición directa sobre cartílago cricoides de espécimen 2.M.50

5.8.4.3.2. Medición sobre modelos digitales

Una vez completado el proceso de postprocesamiento de los escaneos 3D, se procedió a realizar las mediciones sobre los modelos digitales de los cartílagos laríngeos. Para ello, se utilizó el software EinScan , una herramienta especializada en la manipulación y análisis de modelos tridimensionales en formato .stl. Este software permitió identificar con precisión los puntos antropométricos previamente definidos en el protocolo de medición, facilitando la obtención de las distancias lineales correspondientes entre ellos.

Las mediciones se realizaron de forma manual dentro del entorno digital, utilizando la herramienta de medición incorporada en el software, que permitió registrar longitudes lineales entre dos puntos seleccionados en la malla tridimensional. El investigador principal fue el encargado de llevar a cabo esta actividad, siguiendo los mismos criterios y secuencias definidos para la medición directa, con el fin de asegurar la comparabilidad entre ambos métodos.

Para cada espécimen, se midieron los cartílagos laríngeos tiroides y cricoides previamente escaneados y disponibles como modelos digitales. Solo se midieron dichos cartílagos ya que fueron los analizados en la medición directa, las causas fueron ya descritas. Sin embargo también se encontró dificultad para el escaneo de los cartílagos aritenoides, por su tamaño y dificultad para ser capturado por el escáner. Estas mediciones fueron registradas y organizadas sistemáticamente en bases de datos para su posterior análisis estadístico, permitiendo el contraste de los valores obtenidos por escaneo 3D con los datos de medición directa.

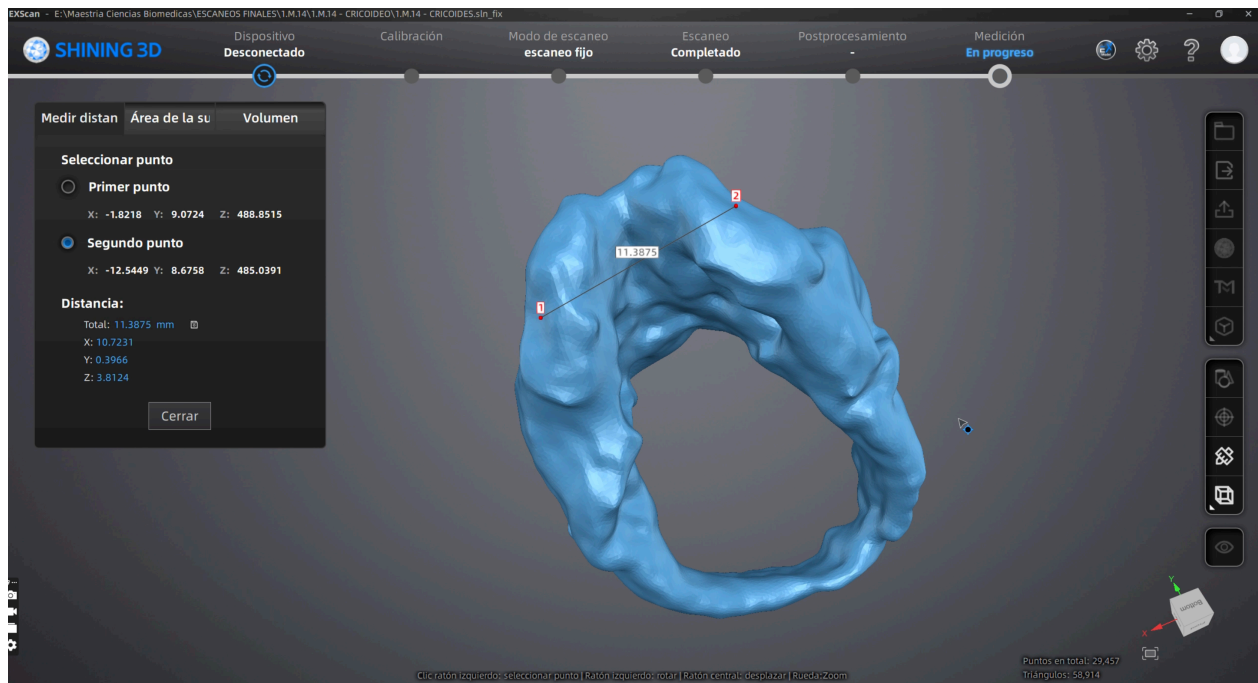


Imagen 18 Medición digital de cartílago tiroideo 1.M.14 segmento c.SA.a.c (D) <-> c.SA.a.c (I)

5.8.4.4. Organización de datos

Una vez recolectados los datos morfométricos, tanto de las mediciones directas como de las digitales, la organización sistemática de esta información se volvió fundamental para asegurar su integridad, facilitar su análisis posterior y garantizar la trazabilidad de cada medición.

Para este propósito, se utilizó el software Microsoft Excel, creando una base de datos estructurada. Dentro de un mismo archivo de Excel, se designó una hoja de cálculo independiente para cada espécimen (ej., "1.M.14", "2.M.50"), lo que permitió mantener la información de cada laringe de forma segregada y de fácil acceso.

La estructura de las hojas de cálculo se basó en la rejilla de recolección de datos previamente diseñada y estandarizada, la cual es un anexo detallado del Protocolo Operativo Estandarizado (POE) de medición. Esta rejilla definió la nomenclatura específica para cada variable (medición lineal o angular), el orden de registro y los formatos de datos, asegurando la uniformidad en la consignación de la información.

Se implementaron medidas de control de calidad de los datos durante la fase de ingreso. Estas incluyeron la verificación cruzada de valores para identificar posibles errores de transcripción y la revisión de rangos lógicos para las mediciones, lo que contribuyó a la fiabilidad de la base de datos.

Finalmente, todos los archivos de Excel fueron almacenados de forma segura en un sistema de respaldo digital para prevenir cualquier pérdida de información y asegurar su disponibilidad para las fases futuras del proyecto. Esta meticulosa organización de los datos es crucial para el análisis comparativo que se realizará en las fases IV y V, donde se evaluará la fidelidad del modelado 3D y se explorarán las variaciones morfológicas de los cartílagos laríngeos humanos

5.8.5. Fase IV Impresión 3D y medición de modelos impresos en 3D

El propósito principal de esta fase fue elaborar réplicas tridimensionales de los cartílagos laríngeos utilizando herramientas teóricas y técnicas propias de la fabricación aditiva. Las actividades se desarrollaron en el Laboratorio Estratégico Compartido (LEC) de Fabricación Digital de la Universidad del Valle, perteneciente a la Vicerrectoría de Investigaciones.

Previo al inicio del proceso de impresión, el investigador principal, junto con la co-tutora, llevó a cabo cinco sesiones de revisión bibliográfica centradas en los fundamentos de la impresión 3D, la fabricación aditiva y el uso de escáneres, software de modelado e impresoras 3D. Adicionalmente, el investigador principal recibió capacitación técnica en el manejo de los equipos, guiado por la co-tutora y con el apoyo del personal del laboratorio. Para llevar a cabo la impresión de los modelos, previamente se desarrolló el escaneo de los especímenes obteniendo los modelos en formato stl, después se realizó la impresión de los modelos, los cuales fueron limpiados y finalmente se realizó la medición de los mismos.

5.8.5.1. Preparación de los archivos para impresión

Los modelos digitales de los cartílagos, obtenidos durante la fase de escaneo (Fase III), fueron sometidos a un riguroso proceso de preparación para asegurar su aptitud para la impresión 3D. Este proceso se realizó utilizando el software EXScan 4.0 (Shining 3D®), una herramienta clave para la manipulación y optimización de mallas 3D. Las tareas incluyeron:

- Revisión de artefactos digitales: Se limpiaron las imperfecciones y los datos no deseados que pudieran haber surgido durante el proceso de escaneo o postprocesamiento, como por ejemplo la eliminación de los soportes de escaneo
- Corrección de errores topológicos: Se identificaron y repararon problemas en la malla como bordes abiertos, vértices sueltos o mallas no manifold, que podrían causar errores durante la impresión. Este proceso de limpieza y corrección tomó entre 45 minutos y 1 hora por cartílago, dependiendo de su complejidad morfológica. Finalmente, estos modelos fueron renderizados en un formato stl que permitiera su impresión.

5.8.5.2. Configuración de parámetros de impresión (slicing)

Una vez que los modelos STL fueron validados, se importaron al software de laminado Chitubox, donde se definieron los parámetros específicos de impresión. Esta etapa es crítica para optimizar la calidad y el éxito de la impresión, requiriendo entre 30 y 45 minutos por modelo para su configuración y optimización. Los parámetros clave establecidos fueron:

- Altura de capa: 0.05 mm, seleccionada para garantizar una alta resolución y la captura de detalles finos en la superficie de los cartílagos.
- Velocidad de impresión: 30 mm/s, un valor optimizado para el tipo de resina y

la resolución deseada, equilibrando el tiempo de impresión con la precisión.

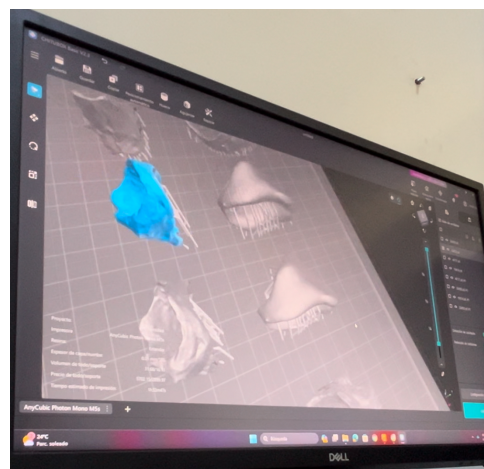


Imagen 19. Adecuación de soporte para impresión

Se utilizó una resina fotopolimérica estándar de alta precisión marca anycubic, específicamente formulada para impresoras de resina LCD/DLP/SLA, que permite obtener detalles finos y una superficie lisa, replicando fielmente la morfología del cartílago.

Cada cartílago se orientó cuidadosamente en la plataforma de impresión para minimizar la necesidad de soportes y maximizar la precisión de las superficies críticas. Se utilizaron soportes automáticos, con una configuración que permitió un fácil desprendimiento sin dañar la superficie del modelo, a la vez que se aseguraba la estabilidad de la pieza durante la impresión.

5.8.5.3. Impresión de modelos en resina

La impresión 3D se llevó a cabo utilizando la impresora de resina Anycubic Photon Mono 5s. Esta impresora fue seleccionada por su tecnología de pantalla LCD monocromática 6K y su capacidad para lograr una alta resolución (hasta 35 micrones en el eje XY), lo que permitió replicar con una precisión excepcional los detalles morfológicos de las superficies cartilaginosas.

Cada cartílago fue impreso de manera individual, bajo supervisión constante para monitorear el proceso y asegurar la calidad. Se imprimieron un total de 30 modelos. 4 modelos fueron los pilotos para observar el comportamiento de la impresora. Posteriormente se imprimieron tres cartílagos tiroideos y tres cartílagos cricoides de cada uno de los 4 especímenes, se imprimieron 3 para realizar la validación. El tiempo de impresión osciló entre 3 y 6 horas

por cartílago, acumulando aproximadamente 180 horas de impresión en total para todos los modelos.



Imagen 20. Cartílagos laríngeos impresos

5.8.5.4. Posprocesamiento de modelos impresos

Una vez finalizada la impresión, los modelos fueron sometidos a un riguroso protocolo de postprocesamiento para eliminar el exceso de resina líquida y asegurar la solidificación completa del material, así como para preparar las réplicas para la medición. Cada cartílago requirió un promedio de 40 minutos para completar este proceso, que incluyó las siguientes etapas:

- Lavado en alcohol isopropílico al 90%: Los modelos se sumergieron en alcohol isopropílico durante 10 minutos para disolver y eliminar los restos de resina líquida no curada adheridos a la superficie.
- Secado al aire libre: Tras el lavado, los modelos se secaron al aire libre durante 20 minutos para asegurar la evaporación completa del alcohol.
- Curado con luz ultravioleta (UV): Se utilizó una estación de curado UV para exponer los modelos a luz ultravioleta durante 15 minutos por cada cara. Este paso es crucial para

garantizar la solidificación completa y final de la resina, lo que confiere a los modelos su resistencia mecánica y estabilidad dimensional.

- Retiro manual de estructuras de soporte: Las estructuras de soporte, generadas durante la etapa de slicing, fueron retiradas cuidadosamente de forma manual utilizando herramientas de corte fino como corta cutículas y pinzas. Se puso especial atención en minimizar el daño a las superficies anatómicas de los cartílagos.

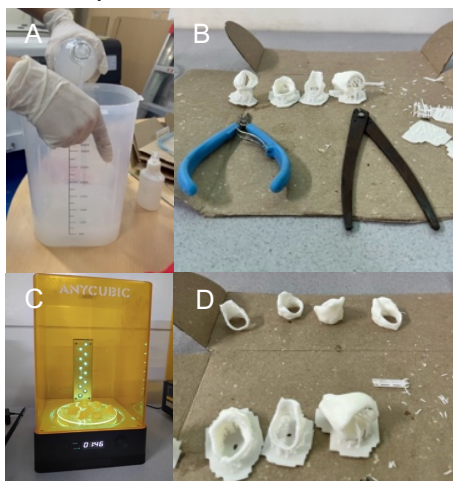


Imagen 21 Postprocesamiento. A. limpieza con alcohol isopropílico. B Retiro de soportes con herramientas. C. Curado con Cuba AnnyCubic. D Modelos finales

- Lijado superficial: En áreas críticas donde los soportes dejaron pequeñas marcas, se realizó un lijado superficial muy delicado. Este proceso se llevó a cabo con precaución para evitar cualquier alteración en los puntos de referencia morfométricos que pudieran afectar la precisión de las futuras mediciones.

5.8.5.5. Medición sobre modelos impresos en 3D

Finalizado el postprocesamiento y curado de los modelos impresos en 3D, se procedió a la medición directa sobre estas réplicas físicas. Se utilizaron los mismos instrumentos de alta precisión empleados en la medición de los cartílagos reales, garantizando la consistencia metodológica: el pie de rey digital con vernier, el micrómetro y el calibre de profundidad.

Las mediciones se registraron siguiendo el Protocolo Operativo Estandarizado (POE) de medición previamente establecido, lo que aseguró la trazabilidad de los datos y permitió la comparación directa con las mediciones originales (de especímenes reales) y digitales (de modelos escaneados).

Para cada cartílago impreso, se realizaron mediciones en tres sesiones distintas para determinar la repetibilidad y fiabilidad de las mediciones sobre las réplicas. Esta fase tomó aproximadamente 25 minutos por modelo, sumando un total de 15 horas adicionales para la recolección de todos los datos en esta etapa.

5.8.6. Fase V Análisis, correlación y validación de datos.

Esta fase tiene como propósito fundamental analizar, correlacionar y validar los datos obtenidos en las fases anteriores (mediciones directas sobre especímenes, modelos digitales e impresos en 3D). Una vez concluida la fase de organización y depuración de la información, se inició el análisis estadístico. Este se desarrolló mediante un enfoque dual, abarcando metodologías descriptivas e inferenciales. La totalidad de los análisis se procesaron utilizando el software IBM SPSS Statistics, y el proceso contó con el respaldo y la guía técnica de la estadística Leidy Johanna Botero. El objetivo primordial fue determinar si existían diferencias estadísticamente

significativas entre los tres métodos de medición (especímenes cadavéricos, modelos digitales y modelos impresos en 3D), además de cuantificar la distorsión morfométrica introducida en cada etapa del proceso de modelado y fabricación 3D. Esto permitió comparar la precisión de los modelos en sus estados cadavéricos, tridimensionales e impresos en 3D.

Es importante señalar que, debido a la limitación de la muestra, en este proyecto no fue posible identificar patrones morfométricos que pudieran ser comparados cuantitativamente con otros estudios. Sin embargo, se llevó a cabo un análisis y discusión descriptivos que permitieron evidenciar patrones relevantes, en consonancia con la literatura científica.

5.8.6.1. Organización y gestión de datos

Los datos derivados de las mediciones realizadas sobre cartílagos reales, modelos digitales y modelos impresos fueron consignados detalladamente en el protocolo de medición correspondiente. Para su procesamiento inicial y preparación para el análisis cuantitativo, estos datos se organizaron en una matriz de datos en formato Excel.

Se utilizó Microsoft Excel, aprovechando la licencia institucional de la Universidad del Valle. Dentro de este entorno, se creó una estructura de hojas de cálculo donde las variables (ej., nombre del espécimen, tipo de cartílago, dimensión medida, tipo de modelo, valor medido) se dispusieron en filas y columnas según su naturaleza. Cada cartílago fue identificado por un código único que permitió su trazabilidad a lo largo de todas las fases del estudio. Se diseñó una plantilla estandarizada para garantizar la homogeneidad en el registro y facilitar su posterior análisis, permitiendo realizar filtros cruzados por espécimen, tipo de modelo y tipo de medición.

Para asegurar la seguridad y la trazabilidad de la información, tanto los archivos de trabajo como los resultados parciales y finales se almacenarán en la nube institucional de OneDrive, en una carpeta protegida con contraseña a la cual solo tendrán acceso los investigadores del proyecto. Los datos serán conservados durante cinco años posteriores a la entrega del informe final, cumpliendo con los lineamientos éticos de confidencialidad y resguardo de la información. Paralelamente, se mantendrá una bitácora física en un libro de actas membretado, en la cual se consignarán observaciones cualitativas, decisiones metodológicas, incidencias y reflexiones del investigador principal durante el desarrollo del análisis. Esta bitácora tendrá valor como instrumento de trazabilidad del proceso investigativo y respaldo ético.

5.8.6.2. Análisis estadístico y cuantificación de distorsión

Una vez organizada la información, se procedió con un análisis estadístico exhaustivo de tipo descriptivo e inferencial. El objetivo principal fue determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los tres métodos de medición (especímenes cadavéricos, modelos digitales y modelos impresos en 3D). Dado que el diseño del estudio implicaba medidas repetidas en los mismos especímenes para cada uno de los tres métodos, y considerando que los datos no cumplían con los supuestos de normalidad y esfericidad requeridos para un ANOVA tradicional, se optó por la implementación de Modelos Lineales Mixtos. Esta estrategia estadística es idónea para manejar datos dependientes y estructuras anidadas West, et al. (2014) (99), permitiendo determinar diferencias significativas mientras se controlaba la variabilidad inherente a cada espécimen como un efecto de factor fijo. Los análisis se realizaron de forma independiente para los cartílagos tiroideos y cricoides. En los casos donde se identificaron diferencias

significativas entre los métodos, se aplicaron pruebas post hoc con corrección de Bonferroni para determinar cuáles comparaciones específicas eran significativas.

Para garantizar la rigurosidad de las mediciones, se emplearon herramientas específicas para cada formato: un calibrador digital Mitutoyo 500-197-30 (con una resolución de 0.01 mm) para las dimensiones de los especímenes físicos e impresos, y las funcionalidades de medición integradas en el software EXScan para los modelos digitales. Se recopilieron diversas dimensiones (longitudes, anchos, alturas y ángulos) de estructuras homólogas en todos los modelos.

Posteriormente, se procedió a la cuantificación de la distorsión morfométrica introducida en cada etapa del proceso de modelado y fabricación 3D. Este análisis se llevó a cabo mediante el cálculo de tres métricas clave para cada estructura medida:

Distorsión digital (modelo cadavérico vs. modelo tridimensional)

Este análisis evalúa los cambios dimensionales generados durante el escaneo del cartílago. El objetivo fue determinar si el proceso de digitalización introduce ampliaciones o contracciones significativas y localizar en qué estructuras ocurre con mayor frecuencia.

$$\text{Distorsión digital (\%)} = \frac{\text{medida 3D} - \text{medida cadaverica}}{\text{medida cadaverica}} * 100$$

Distorsión de impresión (modelo tridimensional vs. modelo impreso)

Este análisis cuantifica el grado de fidelidad del proceso de impresión 3D respecto al modelo digital. Se espera que la distorsión en esta fase sea menor que en la fase anterior.

$$\text{Distorsión de impresión (\%)} = \frac{\text{medida impresa} - \text{medida 3D}}{\text{medida 3D}} * 100$$

Distorsión acumulada (modelo cadavérico vs. modelo impreso)

Esta métrica integra la distorsión total del proceso, desde la medición directa del cartílago hasta la obtención del modelo físico impreso.

$$\text{Distorsión acumulada (\%)} = \frac{\text{medida impresa} - \text{medida cadaverica}}{\text{medida cadaverica}} * 100$$

Para evaluar la fidelidad del proceso de modelado y fabricación tridimensional de cartílagos laríngeos, se aplicaron tres indicadores estadísticos fundamentales: la distorsión media absoluta, la distorsión media con signo y el error cuadrático medio (RMSE). La distorsión media absoluta permite identificar el grado promedio de desviación, independientemente de si es una sobreestimación o subestimación, ofreciendo una medida general del error morfométrico. Por su parte, la distorsión media con signo conserva la dirección del error y es útil para detectar sesgos sistemáticos en el modelo (por ejemplo, si tiende a sobreestimarse o subestimarse en relación con el espécimen real). Finalmente, el RMSE combina en una sola métrica la magnitud y dispersión de los errores, pero penaliza más los errores grandes, lo cual lo convierte en un indicador robusto de precisión global. El análisis conjunto de estos tres valores permite una evaluación más completa y confiable de la calidad morfométrica de los modelos 3D generados.

Distorsión media absoluta:

Promedio de los valores absolutos de las distorsiones individuales. Indica la magnitud promedio del error, independientemente de la dirección

$$\text{Distorsión general} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |d_i|$$

Distorsión media con signo:

Promedio de las distorsiones, considerando signos. Permite identificar si existe una tendencia sistemática a sobreestimar (valores positivos) o subestimar (valores negativos).

$$\text{Distorsión general} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i$$

Error cuadrático medio (RMSE):

Penaliza los errores grandes y proporciona una estimación global de precisión.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2}$$

Donde N es el número total de mediciones (36 para cartílago tiroides y 16 para cartílago cricoides).

5.8.7. Fase VI Organización y redacción del informe final

La Fase VI marcó la culminación del proyecto, enfocándose en la síntesis, consolidación y comunicación de todos los hallazgos. El objetivo principal fue la elaboración de un informe de validación final que integrara de manera coherente y rigurosa los resultados obtenidos en las fases previas. Este informe no solo recopiló los datos, sino que también los analizó en un contexto más amplio, proporcionando una visión integral del estudio. Su estructura se adhirió a criterios académicos y científicos, típica de una publicación o un informe técnico de investigación. Los elementos clave que incluyó este informe fueron:

- Integración de Hallazgos Estadísticos: Se presentaron detalladamente y se contextualizaron los resultados de los análisis estadísticos de la Fase V, incluyendo las comparaciones de fidelidad y distorsión entre las mediciones directas (especímenes cadavéricos), digitales (escaneo 3D) e impresas (modelos 3D).
- Observaciones Cualitativas y Metodológicas: Se documentaron las observaciones críticas y los aprendizajes derivados de cada etapa del proceso: la disección anatómica, los desafíos y soluciones en el escaneo 3D y su postprocesamiento, la optimización de los parámetros de impresión 3D, y cualquier particularidad encontrada durante las mediciones. Esto validó la robustez del Protocolo Operativo Estandarizado (POE) desarrollado.
- Criterios Morfológicos de Precisión y Funcionalidad Anatómica: Se discutieron los hallazgos desde una perspectiva anatómica y clínica, evaluando cómo la fidelidad de los modelos 3D

se alineó con los requerimientos para aplicaciones en docencia, investigación y simulación. Se resaltaron las fortalezas y limitaciones de los modelos creados como herramientas de emulación anatómica.

- **Discusión de las Implicaciones y Aplicabilidad:** Se abordó el potencial impacto del modelado 3D de cartílagos laríngeos en diversos entornos. Esto incluyó su valor como herramienta didáctica en la enseñanza de la anatomía y patología laríngea, su utilidad para la planificación quirúrgica y la simulación preclínica, y su contribución a la investigación biomédica, especialmente en campos como la bioingeniería y la medicina regenerativa.
- **Recomendaciones para Futuras Investigaciones:** Con base en los resultados y la experiencia obtenida, se formularon sugerencias para la mejora de los protocolos y se identificaron nuevas líneas de investigación que pueden surgir a partir de este estudio.
- **El informe final se presentó formalmente ante los tutores del proyecto para su evaluación y aprobación.** Más allá de su función como requisito académico, este documento servirá como insumo fundamental para futuras publicaciones científicas, buscando difundir los conocimientos y la metodología desarrollada a la comunidad académica. Adicionalmente, el informe permitirá sustentar la reproducibilidad metodológica del estudio ante otros grupos de investigación interesados en la emulación anatómica mediante tecnologías de escaneo e impresión tridimensional, sentando las bases para colaboraciones futuras y la adopción de estas técnicas en otros contextos.

6. RESULTADOS

El desarrollo de este estudio, estructurado en seis fases interrelacionadas, permitió la obtención de hallazgos relevantes que abordan directamente los objetivos específicos del proyecto. Estos se organizan en tres dimensiones fundamentales. Primero, se logró la caracterización anatómica y morfométrica de los cartílagos laríngeos a través de la observación directa y digital. Segundo, se consiguió la generación de modelos físicos impresos en tecnología 3D con alta fidelidad anatómica a partir de los especímenes tridimensionales. Finalmente, se realizó la validación cuantitativa de dichos modelos en comparación con las estructuras anatómicas reales. A continuación, se presentan los resultados detallados, organizados en función de los objetivos propuestos.

6.1. Caracterización de la morfometría de los cartílagos laríngeos mediante observación directa y digital

Para responder a este objetivo, las actividades desarrolladas en las Fases II y III dieron como resultado, por un lado, la optimización de los procesos de disección y escaneo de especímenes, y por otro, la descripción morfométrica de los cartílagos laríngeos.

6.1.1. Desarrollo y Validación de Protocolos Operativos Estandarizados (POE)

Un resultado fundamental de esta etapa fue el desarrollo y la validación de tres (3) Protocolos Operativos Estandarizados (POE):

POE de Disección de Cartílagos Laríngeos: Se diseñó y aplicó un protocolo detallado para la disección anatómica de laringes humanas. La aplicación del Protocolo Operativo Estandarizado (POE) de Disección de Cartílagos Laríngeos Humanos resultó en la obtención de especímenes cadavéricos de alta integridad morfológica (*Imagen 22*), lo cual fue crítico para la precisión de los modelos 3D subsiguientes.

Un aspecto clave del POE fue la meticulosa remoción de tejidos blandos y musculares extrínsecos mediante microdisección y utilizando la técnica de disección por debajo del pericondrio, lo que garantizó la delimitación clara de los contornos cartilaginosos sin daños por tracción o corte. La inspección continua y la palpación durante la disección, estipuladas en el protocolo, permitieron identificar y descartar cualquier espécimen con fracturas o anomalías previas a la digitalización, asegurando la calidad inicial de la muestra.

La implementación del POE se asoció con una consistencia excepcional en las mediciones del cartílago cricoides, como se evidenció por la ausencia de diferencias significativas entre los métodos de medición ($p = 0.973$) y los bajos promedios de distorsión media absoluta (rango: 4.20% a 8.29% entre especímenes). Esto sugiere que la combinación de la morfología regular del cricoides y la precisión del protocolo de disección facilitaron su reproducción fiel.

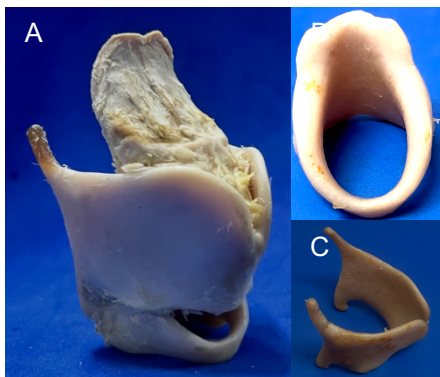


Imagen 22 Especimen 4.F.17. A Laringe articulada. B. Cartílago cricoides. C Cartílago tiroideo

Aunque el POE garantizó la integridad anatómica, la complejidad morfológica del cartílago tiroides presentó un desafío inherente durante el proceso de digitalización. A pesar de la rigurosidad en la disección, la variabilidad interindividual y las características anatómicas de este cartílago fueron factores más influyentes en la distorsión final que la calidad de la disección inicial per se.

Estos hallazgos demuestran que un protocolo de disección estandarizado es fundamental para la obtención de especímenes adecuados para la morfometría 3D, si bien la complejidad anatómica intrínseca de ciertas estructuras puede imponer límites a la precisión del modelo final en las etapas subsiguientes.

Por otra parte, durante su ejecución, se identificaron y documentaron variaciones anatómicas como el foramen tiroideo (*Imagen 23*) y agenesia de asta superior izquierda (*Imagen 24*) en los especímenes 5.M. xx y 6.M.xx correspondientemente. Estas variantes refuerzan la necesidad de la caracterización más profunda de la anatomía laríngea.

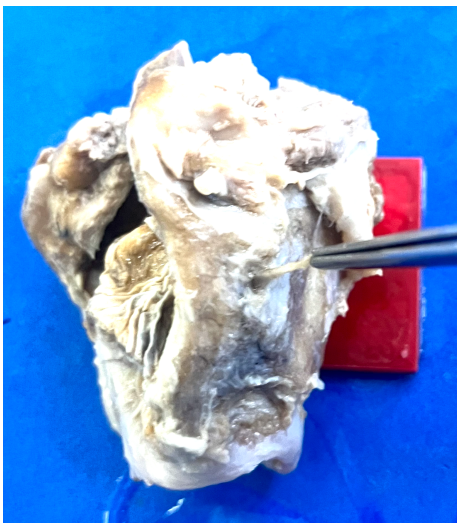


Imagen 23 Espécimen 5.M.xx presenta un foramen tiroideo en su lamina derecha



Imagen 24 Espécimen 6.M.xx presenta agenesia de asta superior izquierda

POE de Escaneo de Cartílagos Laríngeos: Para asegurar la fidelidad anatómica y la alta calidad de los modelos tridimensionales, se estableció y aplicó una secuencia técnica precisa para el escaneo de los cartílagos laríngeos utilizando el escáner EinScan Pro HD, que se indica en la Tabla 4.

Este protocolo fue diseñado para optimizar parámetros críticos y las etapas de postprocesamiento digital, garantizando la obtención de representaciones virtuales anatómicamente precisas y adecuadas para análisis morfométricos detallados.

Un aspecto fundamental del protocolo fue la preparación del espécimen, que incluyó una limpieza superficial cuidadosa y un secado parcial para minimizar artefactos.



Imagen 25 Cámara para controlar la luz durante el escaneo

La estabilización de cada cartílago mediante un soporte rígido personalizado y una base giratoria compatible con el escáner fue crucial para mantener la posición durante el escaneo fijo.

Además, se implementó un control riguroso de la iluminación ambiental del laboratorio utilizando una cámara de control de luz (Imagen 25), diseñada específicamente para este fin, a fin de asegurar una fuente de luz homogénea y difusa, evitando reflejos directos y sombras indeseadas. La cámara tiene una altura de 2 metros y 1 metro de ancho y profundidad, además de estar pintada en su interior por negro, dejando solo una cara libre para la acomodación del escáner.

Criterio	Detalle técnico	
Computador	Intel i7 (10ma generación o superior), RAM: 16GB DDR4 o superior, Almacenamiento: 512GB SSD NVMe, Tarjeta Gráfica: NVIDIA GeForce RTX 3050 (o equivalente) con 4GB GDDR6 o superior, Sistema Operativo: Windows 10 Pro (64-bit) o Windows 11 Pro (64-bit).	
Preparación del espécimen	Limpieza superficial cuidadosa con solución salina; secado parcial con papel absorbente para eliminar el exceso de humedad;	
Estabilización	Uso de soporte rígido personalizado; base giratoria compatible con el escáner EinScan Pro HD para rotación automática durante el escaneo fijo.	
Iluminación	Fuente de luz homogénea y difusa; evitar reflejos directos en el espécimen; control de la iluminación ambiental del laboratorio para minimizar sombras indeseadas utilizando cámara de control de luz diseñada para tal motivo.	
Parámetros de escaneo	Modo escaneo: Escaneo fijo Modo de alineación: Marcadores en la plataforma Pasos: 30 (equivalente a una rotación de 12 circ por paso) Velocidad: 5 Numero de vueltas: 1 vuelta completa (para cada posición de escaneo, el software gestiona la rotación) Distancia: teniendo en cuenta la base del escáner y el tornamesa. Escáner a 73 cm de altura y la distancia entre la base y el tornamesa 50 cm Se realizan 3 escaneos por cada orientación o “cara” del cartílago para asegurar una cobertura completa y redundancia de datos.	
Numero de escaneo y posicionamiento por cartílago	Cartílago tiroideo	<i>Los escaneos se realizan sobre el tornamesa, utilizando el soporte circular a medida del tornamesa, sin tapar los marcadores de la plataforma</i> 3 escaneos, ubicando el cartílago sobre el borde posterior 3 escaneos, ubicando el cartílago sobre el borde inferior y las asta inferiores 3 escaneos, ubicando el cartílago sobre el borde superior y las asta superiores 3 escaneos, ubicando el cartílago sobre la lámina derecha 3 escaneos, ubicando el cartílago sobre la lámina izquierda
	Cartílago cricoides	<i>Los escaneos se realizan sobre la tornamesa, utilizando el soporte circular a medida del tornamesa, sin tapar los marcadores de la plataforma.</i> 3 escaneos, ubicando el cartílago sobre el borde inferior 3 escaneos, ubicando el cartílago sobre el borde superior 3 escaneos, ubicando el cartílago sobre el borde lateral derecho 3 escaneos, ubicando el cartílago sobre el borde lateral izquierdo

Tipo de archivo generado	Nube de puntos en formato (.sln_fix).
Postprocesamiento	EXScan. Limpieza de malla (eliminación de ruido y artefactos), cierre de orificios (reparación de superficies incompletas), simplificación geométrica (reducción de polígonos manteniendo detalle), suavizado (para eliminar irregularidades menores), alineación y fusión de escaneos individuales.

Tabla 4 Detalles técnicos para la obtención de modelos tridimensionales de cartílagos laríngeos

La aplicación de estos parámetros de escaneo, incluyendo la realización de tres escaneos por cada orientación del cartílago, fue crucial para garantizar una cobertura exhaustiva y la redundancia de datos, minimizando las áreas sin información y la propagación de errores. El postprocesamiento digital detallado con EXScan, que incluyó la limpieza de malla, el cierre de orificios, la simplificación geométrica, el suavizado, y la alineación y fusión de escaneos individuales, fue determinante para refinar la calidad de los modelos 3D resultantes, eliminando artefactos y optimizando la fidelidad anatómica.

La implementación de este protocolo de escaneo estandarizado permitió obtener modelos digitales de alta precisión, lo cual fue esencial para los análisis morfométricos detallados y la posterior impresión de réplicas físicas. Esta metodología sistemática contribuyó significativamente a la robustez de los datos obtenidos y a la fiabilidad de las conclusiones derivadas.

POE de Medición de Cartílagos Laríngeos: Para asegurar la sistematicidad y comparabilidad de los datos morfométricos, se desarrolló y aplicó un protocolo exhaustivo de medición de cartílagos laríngeos. Este protocolo, basado en una revisión crítica de la literatura internacional, definió un conjunto preciso de landmarks anatómicos y medidas estandarizadas (detalladas en las *Imágenes 26, 29, 30, 31 y 32*). La implementación de esta guía fue crucial para realizar mediciones reproducibles tanto en especímenes cadavéricos como en sus modelos digitales e impresos, facilitando la comparación inter-estudios.

Durante la aplicación y validación de este protocolo, se identificaron aspectos clave relacionados con la fidelidad de las mediciones. Específicamente, en el cartílago tiroides, se evidenció una distorsión elevada en las mediciones de los bordes posteriores (BP.t.c (D) <-> BP.t.c (I) [externa e interna], AS.p(D) <-> AS.p(I) [externa e interna], Al.r(D) <-> Al.r(I) [externa e interna], Al.p(D) <-> Al.p(I) [externa e interna]; ver *Imágenes 27 y 28*). Esta distorsión se atribuyó a la variabilidad inherente en la forma y abertura del borde posterior del cartílago tiroides una vez disecado, ya que su posición natural está condicionada por la articulación cricotiroides. Este hallazgo llevó a una modificación esencial del protocolo: se determinó que estas variables específicas deben medirse con el cartílago tiroides articulado para obtener datos precisos y representativos.

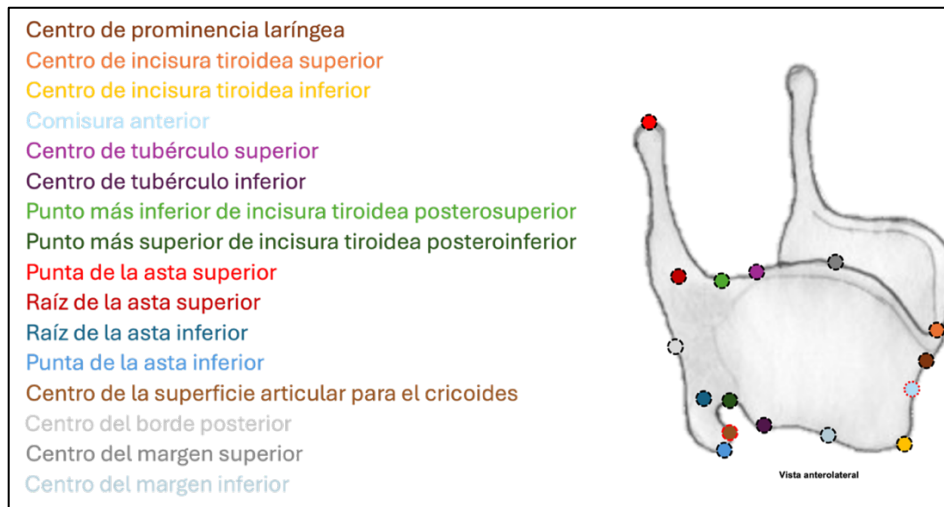


Imagen 26 Puntos landmarks de cartílago tiroides

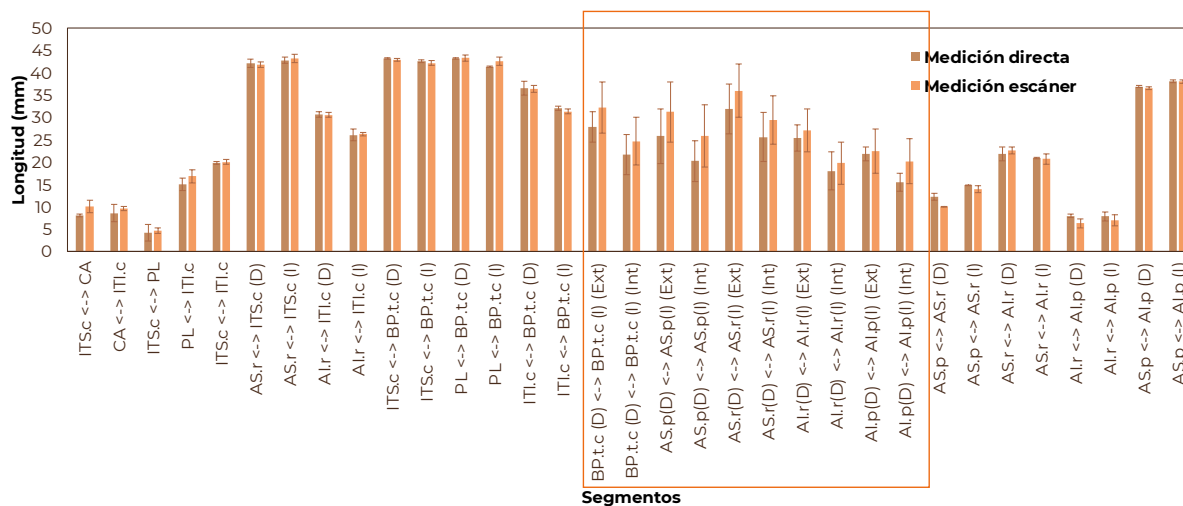


Imagen 27 Promedio de medidas de Cartílago tiroides 1.M.14 y análisis de la desviación de dichas medidas

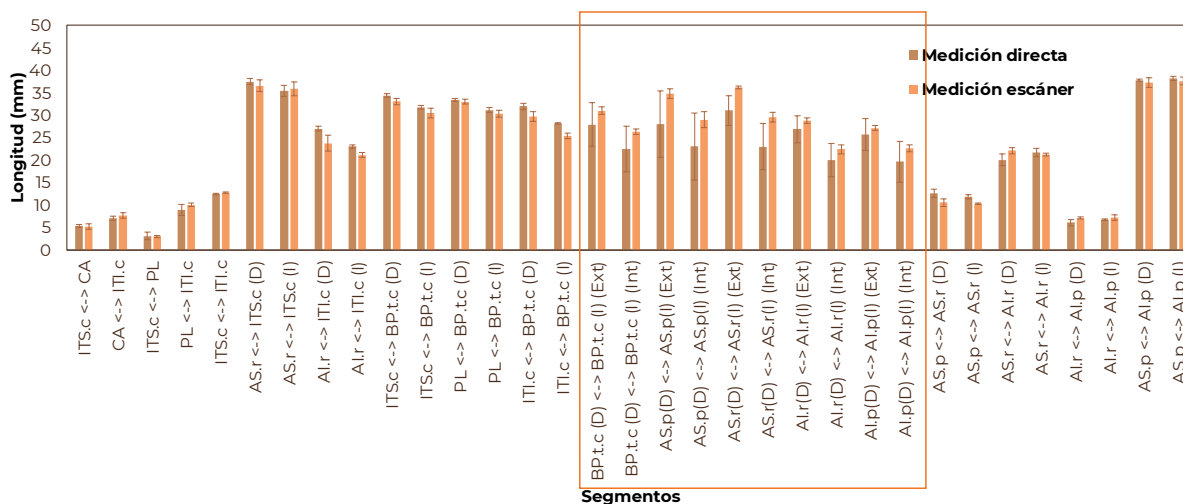


Imagen 28 Promedio de medidas de Cartílago tiroides 4.F.17 y análisis de la desviación de dichas medidas

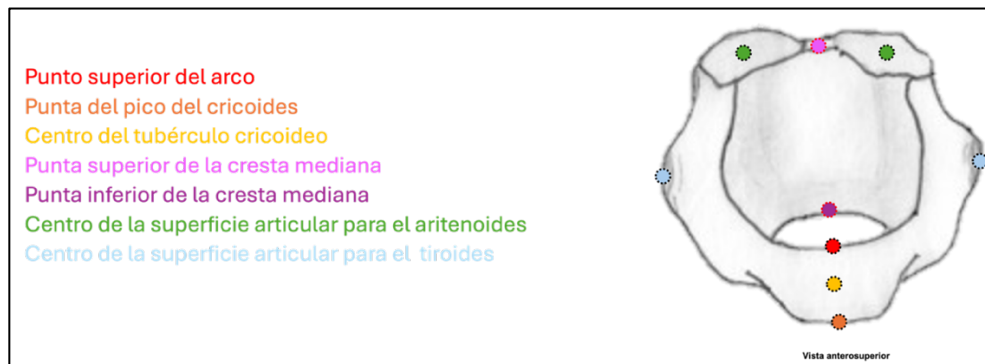


Imagen 29 Puntos landmarks de cartílago cricoides

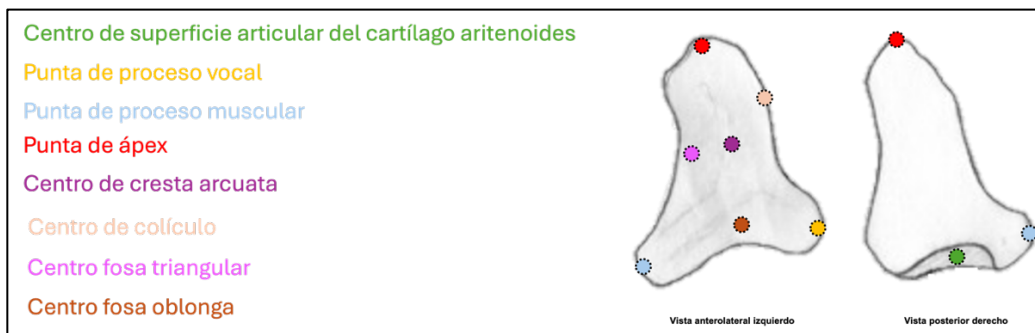


Imagen 30 Puntos landmarks de cartílago aritenoides

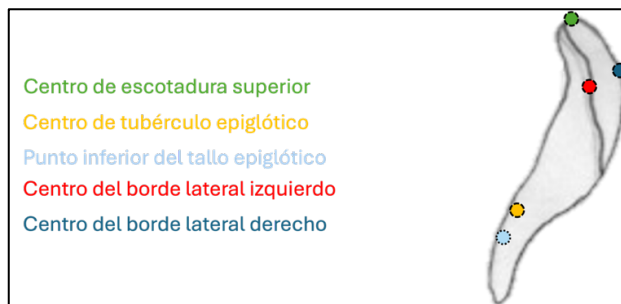


Imagen 31 Puntos landmarks de cartílago epiglótico

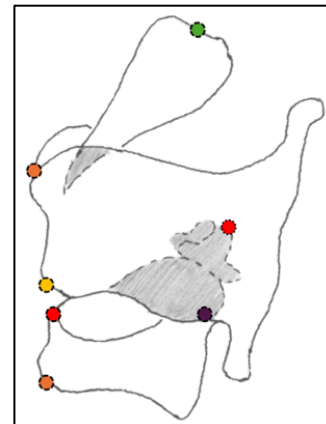


Imagen 32 Puntos landmarks de cartílagos articulados

La alta fiabilidad interobservador observada en todos los especímenes estudiados para cada medida de este protocolo confirma su validez y reproducibilidad. Este resultado es fundamental para asegurar la calidad y comparabilidad de los datos morfométricos obtenidos, permitiendo inferencias fiables sobre las características anatómicas de los cartílagos laríngeos humanos en futuras fases del estudio. El conjunto de estos tres protocolos operativos estandarizados (Disección, Escaneo y Medición) resultó en la consolidación de una metodología técnico-científica sólida. Esta aproximación no solo fue validada internamente a través de su rigurosa aplicación en el presente estudio, sino que también establece las bases para su replicación exacta en futuros

trabajos de investigación, enseñanza anatómica o el desarrollo de dispositivos biomédicos, garantizando la consistencia y fiabilidad de los datos en el campo de la morfometría laríngea.

6.1.2. Caracterización de la muestra y generación de modelos digitales

La fase inicial del estudio involucró la caracterización rigurosa de la muestra anatómica y la subsiguiente generación de modelos digitales de alta resolución, fundamentales para el análisis morfométrico. De un total de seis (6) laringes humanas disecadas, se seleccionaron cuatro (4) especímenes (1.M.14, 2.M.50, 3.M.90 y 4.F.17) que cumplieron estrictamente con los criterios de integridad anatómica, óptimo estado de conservación y ausencia de alteraciones morfológicas evidentes. La caracterización detallada por sexo, edad estimada y condiciones específicas de conservación de cada espécimen se documentó en la Fase II del estudio.

A partir de estos cuatro especímenes seleccionados, se generaron modelos digitales tridimensionales de alta resolución mediante el escáner EinScan Pro HD y su posterior procesamiento en el software especializado EinScan. Estos modelos constituyeron la base digital para todas las mediciones morfométricas subsiguientes y la posterior impresión 3D. Las estructuras digitalizadas para cada espécimen se detallan en el anexo 8, se presenta a continuación las imágenes para el cartílago 4.F.17

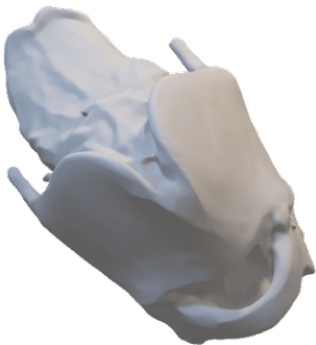
Espécimen	4.F.17
A. Modelo 3D 1 Laringe articulada 4.F.17	B. Modelo 3D 2 Cartílago tiroideo 4.F.17
	
C. Modelo 3D 3 Cartílago cricoides 4.F.17	D. Modelo 3D 4 Cartílago epiglótico 4.F.17
	

Tabla 5 Modelos 3D de especimen 4.F.17. A Laringe articulada. B Cartílago tiroideo C. Cartílago cricoides D. Cartílago epiglótico

Es importante destacar que, aunque se generaron modelos digitales de la laringe articulada y del cartílago epiglótico, estas estructuras no fueron incluidas en el análisis morfométrico final. Esta decisión se debió a la imposibilidad de obtener mediciones completas en los tres momentos definidos en la metodología (cadavérica, digital e impresa) para dichas estructuras. Específicamente, los cartílagos aritenoides no pudieron ser escaneados con la precisión requerida para mediciones confiables debido a su tamaño reducido y a las limitaciones técnicas inherentes a la captura de su geometría tridimensional con el equipo disponible.

No obstante, los modelos digitales generados para los cartílagos tiroides y cricoides conservaron con alta fidelidad la forma, el volumen y los rasgos morfológicos esenciales de los cartílagos originales. Esta precisión en la digitalización fue un factor clave que no solo facilitó su medición virtual con gran exactitud, sino que también sirvió como una base confiable para su posterior materialización mediante la impresión 3D.

6.1.2.1. Diseño y fabricación de soportes anatómicos para escaneo y preservación

Para garantizar la estabilidad y la correcta orientación de los especímenes durante el escaneo 3D, se llevó a cabo un proceso iterativo de diseño y fabricación de una serie de soportes personalizados. Este enfoque, basado en pruebas y ajustes continuos, permitió optimizar las estructuras para cada tipo de cartílago. Los soportes fueron impresos en ácido poliláctico (PLA) y adaptados a la morfología particular de cada cartílago, constituyendo un resultado clave en la estandarización del proceso de digitalización. Los diseños (modelos 3D) se puede apreciar en el anexo 8

Soporte de laringe articulada

Inicialmente, se diseñó un soporte con una base circular y dos varillas rectangulares verticales (19 cm de longitud) para sostener lateralmente la laringe mediante ganchos tipo pinza. Sin embargo, las pruebas iniciales revelaron limitaciones significativas: la longitud de 19 cm excedía el rango de escaneo del equipo, y el uso de doble punto de suspensión comprometía la forma anatómica natural del espécimen, induciendo torsión o inclinación.

Una segunda versión redujo la altura de las varillas a 17 cm, permitiendo que la laringe se ubicara dentro del rango de escaneo, pero el anclaje dual persistió en afectar la posición anatómica.

Finalmente, la versión optimizada y validada consistió en una única varilla central de 5 cm de longitud, conectada a una base circular transparente que permitía insertar la laringe por su canal, respetando su forma y disposición natural. Esta configuración logró un equilibrio óptimo entre estabilidad estructural, compatibilidad con el escáner y conservación morfológica del espécimen durante la captura 3D. El proceso de iteración y prueba fue fundamental para ajustar el diseño a las condiciones específicas, resultando en un soporte funcional, anatómicamente respetuoso y técnicamente viable

Soporte para cartílago tiroides

Se diseñó un soporte especializado con una base triangular ancha y una columna vertical que sostiene un brazo horizontal en forma de “T” invertida. La parte superior del brazo incorpora dos salientes paralelas con un espacio para un tope intercambiable. Este diseño modular del tope optimiza la versatilidad, permitiendo fijar la base del cartílago tiroides en una posición anatómicamente coherente y ajustarse a diferentes dimensiones de especímenes, asegurando una sujeción firme sin deformaciones.

Soporte para cartílago cricoides

Este soporte fue diseñado para ofrecer una sujeción estable y anatómicamente funcional del cartílago cricoides. Consiste en una estructura vertical central en forma de cruz con cuatro pares de extensiones horizontales simétricas. Estas extensiones proporcionan puntos de apoyo que mantienen la estabilidad del cartílago y facilitan su adaptación según su curvatura y diámetro. Su base plana y ancha asegura la fijación segura a la tornamesa, y su diseño modular permite ajustes de altura mediante espaciadores.

Soporte para cartílago epiglótico

Diseñado para adaptarse a la morfología alargada y curvada de la epiglotis, este soporte presenta una estructura vertical central con dos marcos rectangulares paralelos. El marco superior incorpora una abertura central que permite insertar la epiglotis, conservando su curvatura natural y minimizando las zonas de ocultamiento. Una superficie curva en la parte posterior del marco superior sirve como guía anatómica, asegurando que el cartílago no sufra deformaciones durante la fijación y mantenga su orientación original, lo que facilita la captura de detalles finos.

Soporte para cartílago aritenoides

Este soporte específico para los cartílagos aritenoides presenta una geometría troncocónica que favorece la estabilidad y el centrado. La cavidad circular cóncava en la parte superior se adapta al tamaño reducido y la forma piramidal de los aritenoides, permitiendo su fijación sin interferir con sus superficies articulares. Este diseño facilita la orientación vertical del cartílago para una captura 3D precisa y permite la rotación sin sombras proyectadas.

Obtención de modelos 3D cartílagos laríngeos humanos

Para el objetivo de obtener modelos 3D de cartílagos laríngeos humanos, las actividades desarrolladas en la Fase IV del estudio resultaron en la generación exitosa de réplicas físicas de alta fidelidad de los cartílagos laríngeos en resina. Un aspecto fundamental para el éxito de este proceso fue el diseño y desarrollo de soportes anatómicos específicos que permitieron un escaneo óptimo de los especímenes

6.1.3. Impresión 3D precisa de cartílagos laríngeos en resina

Se logró la impresión exitosa de réplicas físicas de alta fidelidad de los cartílagos laríngeos (tiroides y cricoides) de los cuatro especímenes seleccionados, utilizando una impresora 3D de resina Anycubic Photon Mono 5s. La selección y el ajuste precisos de los parámetros de impresión fueron fundamentales para este resultado: se empleó una resina fotopolimérica estándar de alta precisión, una altura de capa de 0.05 mm y una velocidad de impresión de 30 mm/s, lo que permitió una reproducción de alta resolución de las estructuras anatómicas. La orientación estratégica de los modelos en la plataforma de impresión y la generación optimizada de estructuras de soporte fueron cruciales para minimizar deformaciones y preservar la integridad de las superficies.

Las réplicas impresas conservaron con notable fidelidad los detalles anatómicos esenciales y presentaron una alta congruencia respecto a las estructuras originales disecadas y sus modelos digitales. Esto se evidenció en la clara diferenciación de crestas, tubérculos, láminas y arcos, así como en la preservación de las curvaturas naturales de los cartílagos, lo que valida la calidad del proceso de fabricación aditiva para propósitos morfométricos (ver Imagen 33).



Imagen 33 Cartílagos cricoides. Modelos impresos en resina de (fila inferior) vs especímenes cadavéricos. De izquierda a derecha: espécimen 1.M.14 - espécimen 2.M.50 - espécimen 3.M.90 – espécimen 4.F.17

6.1.4. Banco de datos morfométricos

Como resultado directo de las meticulosas disecciones cadavéricas, el escaneo digital y la impresión de los modelos obtenidos se logró establecer un robusto banco de datos morfométricos. Este banco proporciona una caracterización exhaustiva de los cartílagos tiroideos y cricoides, documentando una amplia gama de variables de longitud y ángulos anatómicos.

Para la construcción de esta base de datos, se definieron y midieron 36 variables específicas para el cartílago tiroideos y 15 variables para el cartílago cricoides. Cada uno de los ocho cartílagos analizados (cuatro tiroideos y cuatro cricoides, correspondientes a los cuatro especímenes seleccionados) fue sometido a tres mediciones en diferentes momentos y sobre distintas plataformas: directamente sobre el espécimen cadavérico, sobre el modelo digital 3D y sobre el modelo impreso en 3D.

Las mediciones directas sobre los especímenes cadavéricos (ver *anexo 11*) se realizaron en tres momentos específicos: inmediatamente después de la disección, a los 2 meses y a los 4 meses post-disección. Esto permitió evaluar la estabilidad de las dimensiones a lo largo del tiempo. De forma paralela, las mediciones sobre los modelos digitales 3D (ver *anexo 11*) replicaron este esquema temporal, ofreciendo una comparabilidad directa entre la anatomía física y su representación digital. Finalmente se tomaron mediciones en los modelos impresos (ver *anexo 11*)

La implementación de este enfoque multifacético resultó en la compilación de una matriz de datos considerable, que contenía 612 mediciones directas sobre los especímenes cadavéricos, 612 mediciones sobre sus modelos digitales y 612 mediciones específicas en los modelos impresos. Se contemplan 432 mediciones para los cartílagos tiroideos y 180 para el cartílago cricoides

La organización y el procesamiento inicial de estos datos se llevaron a cabo utilizando Microsoft Excel, mientras que el análisis estadístico y comparativo se realizó con el software SPSS, asegurando la rigurosidad y la capacidad de análisis inferencial.

La riqueza de este banco de datos no solo permite la caracterización detallada de la morfología laríngea, sino que también establece una sólida plataforma para la validación cruzada entre los

diferentes formatos de espécimen (cadavérico, digital e impreso), proporcionando una base empírica robusta para la comprensión de las propiedades biomecánicas y las variaciones anatómicas de la laringe humana.

Esta información es crucial para cuantificar la distorsión acumulada en el proceso de replicación 3D y para evaluar la viabilidad de usar modelos impresos como sustitutos precisos de los especímenes reales en diversos contextos de investigación, educación o aplicación clínica.

6.2. Validación de los modelos 3D generados con técnicas digitales y de medición directa

El objetivo final de esta fase fue determinar las diferencias estadísticamente significativas en las mediciones de los cartílagos laríngeos al comparar tres métodos distintos de obtención de datos: el espécimen cadavérico original, el modelo tridimensional digital (obtenido mediante escáner EinScan Pro HD y software EXScan), y el modelo físico impreso en resina. Las mediciones en los modelos cadavéricos e impresos se realizaron con un calibrador digital Mitutoyo 500-197-30, mientras que las mediciones en los modelos digitales se llevaron a cabo con las herramientas integradas en el software EXScan.

Dado el diseño de medidas repetidas, donde cada estructura anatómica fue medida múltiples veces en los mismos cuatro especímenes a través de los tres métodos, y considerando el número reducido de sujetos junto con la violación de supuestos de ANOVA tradicional, se optó por emplear Modelos Lineales Mixtos. Esta estrategia estadística, robusta para datos dependientes y estructuras anidadas (West et al., 2014) (99), permitió modelar cada espécimen como un efecto de factor fijo, controlando la variabilidad individual y comparando los métodos de medición con un ajuste por esta variabilidad inherente. Los análisis se realizaron de forma independiente para el cartílago tiroides y el cartílago cricoides.

6.2.1. Análisis de diferencias entre métodos

Cartílago Tiroides

Para el cartílago tiroides, se evaluaron 36 estructuras por espécimen, resultando en un total de 432 observaciones (4 especímenes $\times$ 3 métodos $\times$ 36 estructuras). El modelo mixto empleado conservó todas las observaciones, incrementando la potencia estadística del análisis.

Los resultados de las pruebas de efectos fijos (*Tabla 6*) indicaron diferencias estadísticamente significativas tanto entre los métodos de medición ($p=0.001$) como entre las distintas estructuras anatómicas evaluadas ($p=0.000$). Este hallazgo llevó a rechazar la hipótesis nula, confirmando que los tres métodos no son equivalentes en la medición del cartílago tiroides.

Pruebas de efectos fijos de tipo III^a

Origen	gl de numerador	gl de denominador	F	Sig.
Método	2	394	7,069	,001
Estructura	35	394	137,262	,000

Tabla 6 Pruebas de efectos fijos de (tipo III^a) para el cartílago tiroides

Una prueba post hoc con corrección de Bonferroni reveló diferencias significativas entre el método cadavérico y el modelo digital 3D (ModeloTri), como se indica por la línea amarilla en la Imagen 35. Sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre el método cadavérico y el modelo impreso en resina (Modelo3DRe), ni entre el modelo digital 3D (ModeloTri)

y el modelo impreso en resina (Modelo3DRe), evidenciado por las líneas verdes en la misma imagen. Este hallazgo sugiere que, mientras que la impresión en resina por sí sola no introduce una distorsión significativa respecto al espécimen original, el proceso de digitalización (ModeloTri) sí introduce una distorsión acumulada que es estadísticamente diferente del original.

mediciones, mientras que los modelos digitales e impresos en resina mostraron valores más altos y consistentes, como ilustra la Imagen 34.

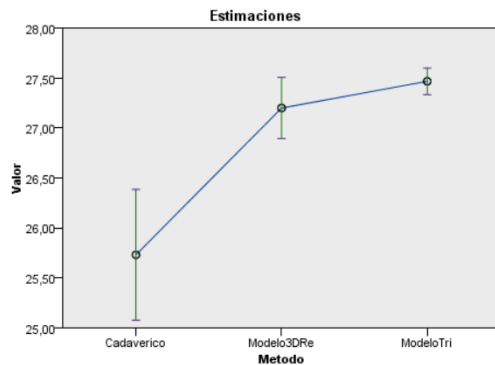
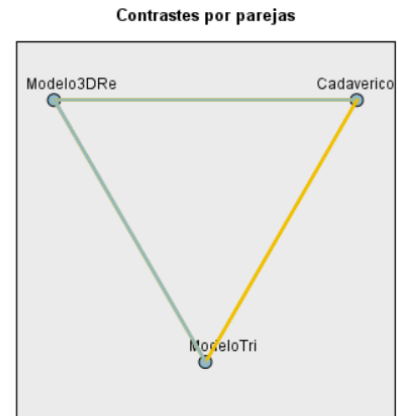


Imagen 34 Estimaciones de los valores promedio y variabilidad para el cartílago tiroides por método



Los contrastes significativos aparecen con un sombreado dorado. El nivel de significación ajustado de Bonferroni secuencial es ,05.

Imagen 35 Contrastes por parejas de los métodos de medición para el cartílago tiroides

Cartílago cricoides

Para el cartílago cricoides, se evaluaron 15 estructuras por espécimen, generando un total de 180 observaciones (4 especímenes $\times$ 3 métodos $\times$ 15 estructuras). El análisis se condujo con el mismo modelo mixto.

En contraste con el cartílago tiroides, las pruebas de efectos fijos (Tabla 7) mostraron que el valor de significancia para el efecto del método fue de $p=0.973$, mucho mayor al umbral del 5%. Esto indica que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los métodos de medición para el cartílago cricoides. Por lo tanto, no se rechazó la hipótesis nula, lo que sugiere que los tres métodos (cadavérico, modelo 3D digital y modelo impreso) pueden considerarse equivalentes en la medición de las estructuras del cartílago cricoides. Similar al tiroides, sí se encontraron diferencias significativas entre las diferentes estructuras del cricoides ($p=0.000$). Esta equivalencia entre los métodos se observa claramente en la Imagen 44, donde los valores promedio de las mediciones de los métodos cadavérico, digital (ModeloTri) e impreso en resina (Modelo3DRe) son muy similares y sus intervalos de confianza se superponen. La ausencia de diferencias significativas entre los métodos se confirma también en la Imagen 37, al no presentarse contrastes significativos (líneas doradas) entre ninguna de las parejas de métodos.

Pruebas de efectos fijos de tipo III^a

Origen	gl de numerador	gl de denominador	F	Sig.
Método	2	163	,028	,973
Estructura	14	163	155,636	,000

Tabla 7 Pruebas de efectos fijos de (tipo III^a) para el cartílago cricoides

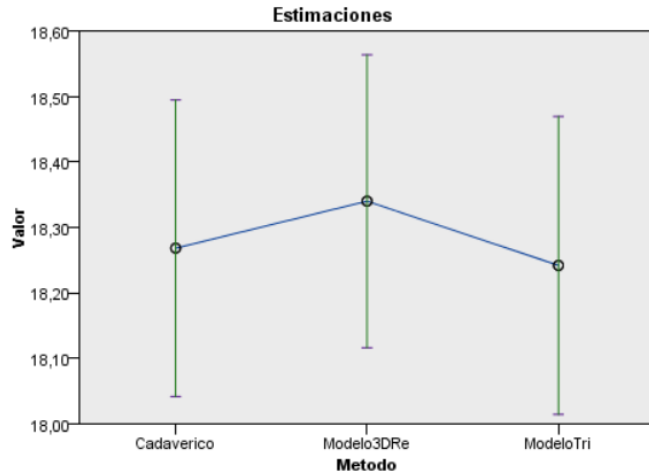
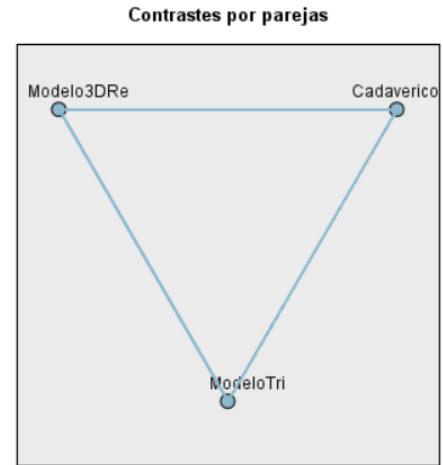


Imagen 36 Estimaciones de los valores promedio y variabilidad para el cartílago cricoide por método.



Los contrastes significativos aparecen con un sombreado dorado. El nivel de significación ajustado de Bonferroni secuencial es ,05.

Imagen 37 Contrastes por parejas de los métodos de medición para el cartílago cricoide

6.2.2. Cuantificación de la distorsión morfométrica por espécimen

Se realizó una cuantificación detallada de la distorsión morfométrica introducida en cada etapa del proceso de modelado y fabricación 3D, utilizando las métricas de distorsión media absoluta, distorsión media con signo y error cuadrático medio (RMSE). Los resultados se presentan individualmente para cada espécimen, seguidos de una síntesis general.

Especimen 1.M.14

Cartílago tiroides 1.M.14

El análisis de distorsión para el cartílago tiroides del espécimen 1.M.14 (*Tabla 8*) evidenció variaciones considerables. La comparación entre el modelo cadavérico y el modelo 3D digital mostró una distorsión media absoluta del 19.55%, con una distorsión media con signo del 15.25% (tendencia a sobreestimar) y un RMSE del 28.88%. Estos resultados indican que el mayor grado de distorsión se introdujo durante el proceso de digitalización o modelado inicial. En la transición del modelo 3D digital al modelo impreso en resina, la distorsión fue notablemente menor (distorsión media absoluta 4.82%, media con signo 1.05%, RMSE 7.88%), reflejando una buena fidelidad del proceso de impresión. Finalmente, la comparación directa entre el modelo cadavérico y el modelo impreso mostró una distorsión media absoluta del 18.14%, una media con signo del 15.81% y un RMSE del 28.37%. Esto demuestra que las distorsiones introducidas en la fase digital se conservaron hasta el modelo físico, sin que la impresión corrigiera significativamente los errores previos. En resumen, el principal origen de distorsión se ubicó en la digitalización inicial del cartílago tiroides, y se recomienda revisar los procesos de escaneo, segmentación y modelado para aumentar la exactitud anatómica de los modelos impresos.

Comparación	Distorsión media absoluta	Distorsión media con signo	Error cuadrático medio (RMSE)
Modelo cadavérico vs. modelo 3D	19,55%	15,25 %	28,88%
Modelo 3D vs. modelo en resina	4,82 %	1,05 %	7,88 %
Modelo cadavérico vs. modelo impreso	18,14 %	15,81 %	28,37 %

Tabla 8 Distorsión morfométrica del cartílago tiroides (Especimen 1.M.14)

Cartílago cricoides 1.M.14:

Para el cartílago cricoides del espécimen 1.M.14 (Tabla 9), los resultados mostraron una notable precisión general en todo el proceso de digitalización e impresión. La distorsión media absoluta fue consistentemente baja en todas las comparaciones (ej. 4.89% para cadavérico vs. 3D; 4.20% para cadavérico vs. impreso), con valores de RMSE también reducidos. La distorsión media con signo para la comparación cadavérico vs. impreso fue de -1.28%, indicando una leve subestimación, lo cual es aceptable. En conjunto, estos resultados reflejan que el cartílago cricoides mantiene una excelente fidelidad durante todo el proceso. La menor distorsión en este cartílago, comparado con el tiroides, podría explicarse por su morfología más regular y simétrica, lo que facilita una mejor captura durante el escaneo y una reproducción más precisa durante la impresión. Los errores observados son bajos y consistentes, lo que hace que estos modelos resulten confiables para fines docentes, clínicos o de investigación.

Comparación	Distorsión media absoluta	Distorsión media con signo	Error cuadrático medio (RMSE)
Modelo cadavérico vs. modelo 3D	4,89%	3,25%	6,22%
Modelo 3D vs. modelo en resina	4,65%	2,19%	6,21%
Modelo cadavérico vs. modelo impreso	4,20%	-1,28%	5,91%

Tabla 9 Distorsión morfométrica del cartílago cricoides (Especimen 1.M.14)

Medicion		Modelo cadaverico	Modelo tridimensional	Modelo impreso en resina
Tiroides				
Ø AT	ETS °	46,00	56,10	52,00
	PL °	54,00	49,50	54,50
	AT °	60,00	59,90	61,00
ITS.c <-> CA		8,16	10,56	9,40
CA <-> ITI.c		8,43	10,11	10,62
ITS.c <-> PL		3,11	4,09	3,31
PL <-> ITI.c		15,39	18,00	17,86
ITS.c <-> ITI.c		19,69	20,27	20,61
AS.r <-> ITS.c	D	42,31	41,99	40,50
	I	43,07	43,19	43,10
Al.r <-> ITI.c	D	30,14	31,09	31,72
	I	25,13	26,12	27,48
ITS.c <-> BP.t.c	D	43,18	43,18	42,97
	I	42,92	42,18	42,90
PL <-> BP.t.c	D	43,10	43,67	43,10
	I	41,37	43,36	42,52
ITI.c <-> BP.t.c	D	34,77	36,87	38,76
	I	31,62	31,48	32,49
BP.t.c (D) <-> BP.t.c (I)	Externo	25,07	35,44	34,96
	Interno	18,22	28,12	27,17
AS.p(D) <-> AS.p(I)	Externo	23,63	35,07	35,72
	Interno	16,66	30,04	30,31
AS.r(D) <-> AS.r(I)	Externo	29,70	39,42	38,36
	Interno	21,75	32,59	31,49
Al.r(D) <-> Al.r(I)	Externo	23,42	29,86	31,67
	Interno	14,45	22,29	24,64
Al.p(D) <-> Al.p(I)	Externo	20,07	25,30	27,28
	Interno	14,32	23,03	22,20
AS.p <-> AS.r	D	12,68	10,11	9,84
	I	14,91	13,27	14,48
AS.r <-> Al.r	D	22,12	23,18	22,30
	I	20,80	21,44	21,21
Al.r <-> Al.p	D	7,78	5,31	7,08
	I	7,28	7,20	7,21
AS.p <-> Al.p	D	37,05	36,32	36,33
	I	37,85	38,11	37,98

Imagen 38 Cartilago tiroides 1.M.14 Mediciones realizadas por 3 métodos; cadaverico, tridimensional y a modelo en resina

Medicion		Modelo cadaverico	Modelo tridimensional	Modelo impreso en resina
Cricoides				
CM.s <-> CM.i		19,37	20,50	19,51
AR.s <-> TC.c		3,57	3,34	3,57
TC.c <-> PC.p		5,45	4,58	4,63
AR.s <-> PC.p		8,04	7,77	7,88
CM.s <-> AR.s	Externo	35,03	33,84	34,36
	Interno	31,08	31,96	29,35
c.SA.t.c(D) <-> c.SA.t.c(I)	Externo	23,42	22,50	24,18
	Interno	14,02	12,39	13,07
CM.i <-> PC.p	Externo	25,76	25,64	25,82
	Interno	21,78	21,66	21,11
c.SA.t.c <-> TC.c	D	23,17	21,89	25,63
	I	20,13	20,53	21,56
c.SA.a.c <-> AR.s	D	29,93	28,77	28,39
	I	26,26	26,69	26,26
c.SA.a.c(D) <-> c.SA.a.c(I)		14,23	13,38	14,00

Imagen 39 Cartilago cricoides 1.M.14 Mediciones realizadas por 3 métodos; cadavérico, tridimensional y a modelo en resina

Espécimen 2.M.50

Cartílago tiroides 2.M.50:

En el cartílago tiroides del espécimen 2.M.50 (*Tabla 10*), las distorsiones observadas durante las etapas de digitalización e impresión fueron moderadas y menores que las del espécimen 1.M.14. La distorsión media absoluta entre el modelo cadavérico y el modelo 3D digital fue del 9.57%, con una leve tendencia a sobredimensionar (4.75% de distorsión con signo). La transición al modelo en resina mostró una ligera subestimación (-3.38% de distorsión con signo). La distorsión acumulada entre el modelo cadavérico y el impreso fue del 8.84% (media absoluta) con un RMSE de 12.29%. En

síntesis, aunque persisten algunas distorsiones, estas son menores que las observadas en el espécimen 1.M.14, lo que sugiere un mejor rendimiento del flujo de trabajo en este caso, aunque sigue siendo necesario optimizar el modelado digital inicial para lograr una mayor fidelidad morfológica del cartílago tiroides (*Imágenes 40 y 41*).

Comparación	Distorsión media absoluta	Distorsión media con signo	Error cuadrático medio (RMSE)
Modelo cadavérico vs. modelo 3D	9,57%	4,75%	12,16%
Modelo 3D vs. modelo en resina	6,04%	-3,38%	7,82%
Modelo cadavérico vs. modelo impreso	8,84%	1,08%	12,29%

Tabla 10 Distorsión morfológica del cartílago tiroides (Especimen 2.M.50)

Medicion		Modelo cadaverico	Modelo tridimensional	Modelo impreso en resina
Ø AT	ETS *	70,00	62,70	56,00
	PL *	69,00	66,70	58,00
	AT *	68,00	75,30	72,00
ITS.c <-> CA		6,07	5,17	5,52
CA <-> ITL.c		9,56	12,35	9,85
ITS.c <-> PL		3,88	4,35	3,74
PL <-> ITL.c		11,68	13,68	12,43
ITS.c <-> ITL.c		16,22	17,58	17,38
AS.r <-> ITS.c	D	33,18	35,01	33,33
	I	34,24	35,58	33,30
Al.r <-> ITL.c	D	27,79	26,54	26,78
	I	24,54	26,73	24,90
ITS.c <-> BP.t.c	D	33,14	33,49	32,44
	I	32,33	33,26	31,61
PL <-> BP.t.c	D	34,30	33,68	32,95
	I	32,69	33,27	33,56
ITL.c <-> BP.t.c	D	31,91	29,89	32,06
	I	30,88	31,19	32,13
BP.t.c (D) <-> BP.t.c (I)	Externo	33,30	34,17	34,45
	Interno	26,83	29,25	27,73
AS.p(D) <-> AS.p(I)	Externo	17,75	21,74	22,44
	Interno	13,55	17,56	17,56
AS.r(D) <-> AS.r(I)	Externo	28,85	33,85	35,74
	Interno	22,09	25,86	28,30
Al.r(D) <-> Al.r(I)	Externo	33,87	35,05	34,70
	Interno	26,50	28,16	26,99
Al.p(D) <-> Al.p(I)	Externo	32,48	33,68	33,99
	Interno	25,00	28,31	26,61
AS.p <-> AS.r	D	15,10	12,53	12,96
	I	11,53	10,88	10,25
AS.r <-> Al.r	D	24,82	26,12	25,32
	I	23,52	25,61	23,83
Al.r <-> Al.p	D	5,57	6,47	6,32
	I	8,58	7,12	7,52
AS.p <-> Al.p	D	45,74	43,57	35,23
	I	39,51	39,07	33,21

Imagen 40 Cartilago tiroides 2.M.50 Mediciones realizadas por 3 metodos; cadaverico, tridimensional y a modelo en resina

Medicion	Modelo cadaverico	Modelo tridimensional	Modelo impreso en resina
CM.s <-> CM.i	21,34	21,05	21,17
AR.s <-> TC.c	3,34	3,34	2,97
TC.c <-> PC.p	4,43	3,39	4,49
AR.s <-> PC.p	6,6	6,68	7,34
CM.s <-> AR.s	Externo	29,76	28,75
	Interno	26,43	26,51
c.SA.t.c (D) <-> c.SA.t.c (I)	Externo	25,92	26,70
	Interno	17,28	19,84
CM.i <-> PC.p	Externo	22,76	22,01
	Interno	17,14	19,43
c.SA.t.c <-> TC.c	D	18,17	17,70
	I	17,60	18,30
c.SA.a.c <-> AR.s	D	25,98	26,64
	I	25,54	25,16
c.SA.a.c (D) <-> c.SA.a.c (I)	19,07	16,11	18,87

Imagen 41 Cartilago cricoides 2.M.50 Mediciones realizadas por 3 metodos; cadaverico, tridimensional y a modelo en resina

Cartílago cricoides 2.M.50:

El análisis del cartílago cricoides en este espécimen (Tabla 11) reflejó un comportamiento global aceptable, con errores generalmente bajos en la distorsión acumulada. La distorsión media absoluta entre el cadavérico y el digital fue del 6.02%, con una leve subestimación (-0.79%). Si bien la impresión del modelo 3D introdujo una distorsión media absoluta del 9.27%, la distorsión acumulada entre el modelo cadavérico y el modelo impreso fue del 5.29% (media absoluta), siendo este el resultado más favorable de las tres comparaciones, y demostrando que el resultado final es bastante preciso con respecto al cartílago original. En conjunto, el cartílago cricoides de este espécimen mostró una buena reproducibilidad a lo largo del proceso de digitalización e impresión. Aunque se detectaron pequeñas distorsiones, estas se mantuvieron dentro de márgenes aceptables para fines docentes y experimentales, lo que consolida al cricoides como un cartílago que mantiene mejor su precisión morfométrica a través del flujo de trabajo técnico.

Comparación	Distorsión media absoluta	Distorsión media con signo	Error cuadrático medio (RMSE)
Modelo cadavérico vs. modelo 3D	6,02%	-0,79%	9,15%
Modelo 3D vs. modelo en resina	9,27%	3,05%	12,48%
Modelo cadavérico vs. modelo impreso	5,29%	1,39%	7,86%

Tabla 11 Distorsión morfométrica del cartílago cricoides (Especimen 2.M.50)

Especimen 3.M.90

Cartílago Tiroides 3.M.90

En el cartílago tiroides del espécimen 3.M.90 (Tabla 12), se identificó una distorsión media absoluta del 10.16% entre el modelo cadavérico y el modelo digital, con una media con signo del 8.32%, indicando una sobredimensión considerable del modelo 3D. El RMSE del 14.08% confirma esta tendencia. La transición a la impresión 3D mostró una distorsión más contenida (6.13% media absoluta), con una leve subestimación. Sin embargo, la distorsión acumulada (cadavérico vs. impreso) fue del 10.84% (media absoluta) con un RMSE de 15.14%, reflejando una acumulación de errores a lo largo del proceso, predominando la sobredimensión. En resumen, este cartílago mostró errores similares a los del espécimen 4.F.17 en términos de sobredimensión durante la digitalización, pero con una impresión ligeramente más contenida. El proceso podría optimizarse revisando el umbral de segmentación durante el escaneo 3D.

Comparación	Distorsión media absoluta	Distorsión media con signo	Error cuadrático medio (RMSE)
Modelo cadavérico vs. modelo 3D	10,16%	8,32%	14,08%
Modelo 3D vs. modelo en resina	6,13%	-2,04%	10,49%
Modelo cadavérico vs. modelo impreso	10,84%	5,84%	15,14%

Tabla 12 Distorsión morfométrica del cartílago tiroides (Especimen 3.M.90)

Cartílago cricoides 3.M.90

En el caso del cricoides del espécimen 3.M.90 (Tabla 13), el patrón de errores fue distinto. La comparación entre el modelo cadavérico y el modelo 3D digital mostró una distorsión media absoluta del 9.38%, con una media con signo negativa (-1.03%), sugiriendo una ligera subestimación. Sin embargo, el RMSE fue relativamente alto (16.24%). La transición a la impresión 3D reveló una distorsión media absoluta del 8.52% con una tendencia a la sobredimensión. En contraste, la comparación entre el modelo impreso y el cartílago original fue más precisa, con una distorsión media absoluta del 6.68% y un RMSE del 8.14%, lo que refleja

una buena fidelidad final del modelo impreso a pesar de los errores acumulados en fases intermedias. Aunque hubo errores considerables en la fase de digitalización e impresión por separado, el modelo impreso final presenta una precisión aceptable. Esto sugiere que la compensación de errores entre fases pudo jugar un papel importante en la fidelidad global.

Comparación	Distorsión media absoluta	Distorsión media con signo	Error cuadrático medio (RMSE)
Modelo cadavérico vs. modelo 3D	9,38%	-1,03%	16,24%
Modelo 3D vs. modelo en resina	8,52%	3,91%	15,88%
Modelo cadavérico vs. modelo impreso	6,68%	0,93%	8,14%

Tabla 13 Distorsión morfométrica del cartílago cricoides (Especimen 3.M.90)

Medicion		Modelo cadaverico	Modelo tridimensional	Modelo impreso en resina
Ø AT	ETS *	51,00	64,30	60,00
	PL *	54,00	57,80	57,00
	AT *	56,00	66,10	62,00
ITS.c <-> CA		6,67	7,54	8,46
CA <-> ITL.c		5,66	7,32	6,04
ITS.c <-> PL		3,49	3,89	1,97
PL <-> ITL.c		11,54	12,07	13,20
ITS.c <-> ITL.c		13,91	14,83	14,64
AS.r <-> ITS.c	D	29,62	30,40	29,18
	I	28,96	27,55	27,42
Al.r <-> ITL.c	D	23,39	23,44	24,53
	I	21,46	21,23	21,64
ITS.c <-> BP.t.c	D	31,77	32,00	31,99
	I	29,88	29,16	29,73
PL <-> BP.t.c	D	32,79	33,19	32,61
	I	29,40	29,82	29,50
ITL.c <-> BP.t.c	D	27,28	26,44	28,78
	I	26,17	24,94	26,27
BP.t.c (D) <-> BP.t.c (I)	Externo	25,47	28,07	29,25
	Interno	19,60	22,73	22,20
AS.p(D) <-> AS.p(I)	Externo	19,81	25,78	27,00
	Interno	14,49	20,59	19,87
AS.r(D) <-> AS.r(I)	Externo	27,21	30,86	31,78
	Interno	21,26	25,57	24,59
Al.r(D) <-> Al.r(I)	Externo	24,70	27,22	27,63
	Interno	18,74	20,60	20,14
Al.p(D) <-> Al.p(I)	Externo	21,94	23,68	25,28
	Interno	16,88	20,18	19,31
AS.p <-> AS.r	D	14,44	13,03	12,05
	I	19,51	18,82	18,19
AS.r <-> Al.r	D	12,79	13,54	13,57
	I	13,73	13,22	13,43
Al.r <-> Al.p:	D	7,19	7,31	6,51
	I	7,16	8,46	6,89
AS.p <-> Al.p:	D	29,24	29,83	32,02
	I	38,04	39,13	38,79

Imagen 42 Cartilago tiroides 3.M.90 Mediciones realizadas por 3 metodos; cadaverico, tridimensional y a modelo en resina

Especimen 4.F.17

Cartilago tiroides 4.F.17

En el cartílago tiroides del espécimen 4.F.17 (Tabla 14), se observaron niveles elevados de distorsión, principalmente en la transición desde el modelo cadavérico al digital. La distorsión media absoluta entre el modelo cadavérico y el modelo 3D digital fue del 15.11%, con una notoria sobredimensión (6.45% con signo). La impresión mostró un comportamiento más controlado, pero la distorsión acumulada entre el modelo impreso y el cadavérico fue alta (15.49% media absoluta, 21.67% RMSE), sugiriendo que el modelo final impreso no reproduce fielmente la morfología original del cartilago tiroides. Este espécimen presentó las mayores distorsiones

Medicion		Modelo cadaverico	Modelo tridimensional	Modelo impreso en resina
CM.s <-> CM.i		20,12	18,96	19,00
AR.s <-> TC.c		2,44	3,62	2,78
TC.c <-> PC.p		3,68	2,49	3,82
AR.s <-> PC.p		5,78	5,96	6,33
CM.s <-> AR.s	Externo	26,42	26,06	26,61
	Interno	24,29	24,62	23,42
c.SA.t.c (D) <-> c.SA.t.c (I)	Externo	16,09	15,76	16,51
	Interno	12,05	11,18	12,88
CM.i <-> PC.p	Externo	22,70	18,27	18,41
	Interno	17,91	16,64	16,46
c.SA.t.c <-> TC.c	D	17,33	17,17	16,85
	I	16,24	16,69	17,37
c.SA.a.c <-> AR.s	D	22,29	23,22	22,98
	I	22,15	22,78	24,25
c.SA.a.c (D) <-> c.SA.a.c (I)		11,38	11,18	10,90

Imagen 43 Cartilago cricoides 3.M.90 Mediciones realizadas por 3 metodos; cadaverico, tridimensional y a modelo en resina

acumuladas en el proceso, con un impacto evidente en la precisión del modelo impreso. Esto puede deberse a irregularidades en el cartílago original o a limitaciones del proceso de escaneo y segmentación, requiriendo atención en fases tempranas del flujo de trabajo para mejorar su fidelidad.

Comparación	Distorsión media absoluta	Distorsión media con signo	Error cuadrático medio (RMSE)
Modelo cadavérico vs. modelo 3D	15,11%	6,45%	19,18%
Modelo 3D vs. modelo en resina	7,46%	0,77%	12,33%
Modelo cadavérico vs. modelo impreso	15,49%	6,80%	21,67%

Tabla 14 Distorsión morfométrica del cartílago tiroides (Especimen 4.F.17)

Cartílago cricoides 4.F.17

El cartílago cricoides del espécimen 4.F.17 (*Tabla 15*) mostró resultados considerablemente más estables que el tiroides. La distorsión media absoluta entre el modelo cadavérico y el modelo 3D digital fue del 5.55%, con bajo RMSE. La fase de impresión 3D mostró un aumento en la distorsión media absoluta (7.62%) y RMSE (14.84%), sugiriendo cierta pérdida de precisión durante la fabricación física. Sin embargo, la distorsión acumulada entre el modelo impreso y el cadavérico fue del 8.29% (media absoluta), con una media con signo cercana a cero (-0.11%), lo que evidencia que, a pesar de ciertos picos de error en la impresión, el modelo impreso se aproxima razonablemente a la anatomía original.

Comparación	Distorsión media absoluta	Distorsión media con signo	Error cuadrático medio (RMSE)
Modelo cadavérico vs. modelo 3D	5,55%	1,74%	7,49%
Modelo 3D vs. modelo en resina	7,62%	-1,63%	14,84%
Modelo cadavérico vs. modelo impreso	8,29%	-0,11%	14,17%

Tabla 15 Distorsión morfométrica del cartílago cricoides (Especimen 4.F.17)

Medicion		Modelo cadaverico	Modelo tridimensional	Modelo impreso en resina
Ø AT	ETS *	66,00	62,20	55,00
	PL *	62,00	57,50	61,00
	AT *	56,00	78,10	73,00
ITS.c <-> CA		5,67	4,54	5,81
CA <-> ITL.c		7,01	8,24	6,90
ITS.c <-> PL		2,30	2,75	1,34
PL <-> ITL.c		9,75	10,22	10,18
ITS.c <-> ITL.c		12,43	12,58	12,81
AS.r <-> ITS.c	D	36,95	35,23	35,20
	I	34,88	34,17	34,67
Al.r <-> ITL.c	D	26,46	22,03	22,78
	I	22,99	20,42	21,13
ITS.c <-> BP.t.c	D	34,67	32,24	32,75
	I	31,77	29,35	30,67
PL <-> BP.t.c	D	33,09	32,39	33,24
	I	30,73	29,39	30,68
ITL.c <-> BP.t.c	D	31,17	28,59	23,11
	I	28,15	24,66	22,82
BP.t.c (D) <-> BP.t.c (I)	Externo	25,35	30,13	31,64
	Interno	20,06	25,55	25,77
AS.p(D) <-> AS.p(I)	Externo	24,04	33,57	35,52
	Interno	19,56	27,04	28,67
AS.r(D) <-> AS.r(I)	Externo	29,24	35,83	36,88
	Interno	19,21	28,34	29,77
Al.r(D) <-> Al.r(I)	Externo	25,43	28,08	29,69
	Interno	17,89	21,26	23,01
Al.p(D) <-> Al.p(I)	Externo	23,69	26,49	27,80
	Interno	17,29	21,70	21,85
AS.p <-> AS.r	D	11,48	9,66	12,04
	I	11,91	10,30	11,60
AS.r <-> Al.r	D	18,55	22,06	20,67
	I	22,45	20,79	21,41
Al.r <-> Al.p:	D	5,43	6,83	6,86
	I	6,66	6,50	6,42
AS.p <-> Al.p:	D	37,78	36,05	37,04
	I	37,72	36,66	37,43

Imagen 44 Cartilago tiroides 4.F.17 Mediciones realizadas por 3 metodos; cadaverico, tridimensional y a modelo en resina

Medicion		Modelo cadaverico	Modelo tridimensional	Modelo impreso en resina
CM.s <-> CM.i		21,50	21,16	20,95
AR.s <-> TC.c		2,16	1,91	2,61
TC.c <-> PC.p		2,94	2,73	1,58
AR.s <-> PC.p		4,34	4,37	4,35
CM.s <-> AR.s	Externo	31,29	32,19	32,21
	Interno	26,68	29,89	26,89
c.SA.t.c (D) <-> c.SA.t.c (I)	Externo	22,17	23,21	22,67
	Interno	13,49	12,43	12,47
CM.i <-> PC.p	Externo	23,56	23,98	24,41
	Interno	19,23	19,84	19,57
c.SA.t.c <-> TC.c	D	19,05	19,35	18,89
	I	17,45	20,76	19,85
c.SA.a.c <-> AR.s	D	26,16	27,59	28,53
	I	26,86	27,78	28,52
c.SA.a.c (D) <-> c.SA.a.c (I)		15,74	15,67	14,83

Imagen 45 Cartilago tiroides 4.F.17 Mediciones realizadas por 3 metodos; cadaverico, tridimensional y a modelo en resina

6.2.3. Síntesis comparativa de la distorsión entre cartílagos

Con el objetivo de evaluar la consistencia y precisión global del proceso de modelado e impresión 3D aplicado a cartílagos laríngeos, se realizó una comparación integrada de los resultados obtenidos en los cuatro especímenes para los cartílagos tiroides y cricoides. Este análisis comparativo permitió identificar tendencias generales, variabilidad interindividual y fases críticas del proceso, aportando evidencia sobre la fidelidad de los modelos anatómicos generados y su aplicabilidad potencial.

Cartilago tiroides

En el caso del cartilago tiroides, se evidenció una variabilidad interindividual marcada en las distorsiones entre el modelo cadavérico y el modelo impreso, con un rango de distorsión media absoluta que va desde el 8.84% (2.M.50) hasta el 18.14% (1.M.14), y un promedio general de distorsión media absoluta del 13.33%. El error cuadrático medio (RMSE) también reflejó esta diferencia, con un promedio de 19.87%, siendo el espécimen 2.M.50 el de menor error (12.29%) y 1.M.14 el de mayor (28.37%). La distorsión media con signo fue positiva en todos los casos, lo que indica una tendencia sistemática a la sobreestimación dimensional en el modelo impreso respecto al cadavérico. Estos hallazgos sugieren que la etapa más crítica del proceso es la digitalización inicial (escaneo y segmentación), siendo responsable de las mayores desviaciones.

A pesar de ello, el rendimiento global fue aceptable, y en especímenes como el 2.M.50 se logró una alta fidelidad entre los modelos.

TIROIDES				
	Comparación	Distorsión media absoluta	Distorsión media con signo	Error cuadrático medio (RMSE)
1.M.14	Modelo cadavérico vs. modelo 3D	19,55%	15,25 %	28,88%
	Modelo 3D vs. modelo en resina	4,82 %	1,05 %	7,88 %
	Modelo cadavérico vs. modelo impreso	18,14 %	15,81 %	28,37 %
2.M.50	Modelo cadavérico vs. modelo 3D	9,57%	4,75%	12,16%
	Modelo 3D vs. modelo en resina	6,04%	-3,38%	7,82%
	Modelo cadavérico vs. modelo impreso	8,84%	1,08%	12,29%
3.M.90	Modelo cadavérico vs. modelo 3D	10,16%	8,32%	14,08%
	Modelo 3D vs. modelo en resina	6,13%	-2,04%	10,49%
	Modelo cadavérico vs. modelo impreso	10,84%	5,84%	15,14%
4.F.17	Modelo cadavérico vs. modelo 3D	15,11%	6,45%	19,18%
	Modelo 3D vs. modelo en resina	7,46%	0,77%	12,33%
	Modelo cadavérico vs. modelo impreso	15,49%	6,80%	21,67%

Tabla 16 Resumen de distorsión del cartílago tiroides de todos los especímenes

Cartilago cricoides

Para el cartílago cricoides, los resultados mostraron menores niveles de distorsión global en comparación con el cartílago tiroides. La distorsión media absoluta entre el modelo cadavérico e impreso fue consistentemente baja, con valores entre 4.20% (1.M.14) y 8.29% (4.F.17), lo que indica una buena precisión en la reproducción morfológica. El RMSE también se mantuvo en niveles moderados, destacando los especímenes 1.M.14 (5.91%) y 3.M.90 (8.14%) por sus bajos errores. A diferencia del tiroides, la distorsión media con signo no evidenció una tendencia sistemática clara: algunos especímenes presentaron sobreestimación (2.M.50 y 3.M.90) y otros subestimación (1.M.14 y 4.F.17). Esta variabilidad sugiere que, si bien la fidelidad general es alta, factores anatómicos individuales pueden influir en la precisión del modelado, sin una dirección de error uniforme. La morfología más regular y simétrica del cricoides en comparación con el tiroides es la razón principal de esta menor distorsión, ya que facilita una captura de escaneo más uniforme y una menor susceptibilidad a las variaciones introducidas por la segmentación y el postprocesamiento.

CRICOIDES				
	Comparación	Distorsión media absoluta	Distorsión media con signo	Error cuadrático medio (RMSE)
1.M.14	Modelo cadavérico vs. modelo 3D	4,89%	3,25%	6,22%
	Modelo 3D vs. modelo en resina	4,65%	2,19%	6,21%
	Modelo cadavérico vs. modelo impreso	4,20%	-1,28%	5,91%

2.M.50	Modelo cadavérico vs. modelo 3D	6,02%	-0,79%	9,15%
	Modelo 3D vs. modelo en resina	9,27%	3,05%	12,48%
	Modelo cadavérico vs. modelo impreso	5,29%	1,39%	7,86%
3.M.90	Modelo cadavérico vs. modelo 3D	9,38%	-1,03%	16,24%
	Modelo 3D vs. modelo en resina	8,52%	3,91%	15,88%
	Modelo cadavérico vs. modelo impreso	6,68%	0,93%	8,14%
4.F.17	Modelo cadavérico vs. modelo 3D	5,55%	1,74%	7,49%
	Modelo 3D vs. modelo en resina	7,62%	-1,63%	14,84%
	Modelo cadavérico vs. modelo impreso	8,29%	-0,11%	14,17%

Tabla 17 Resumen de distorsión del cartílago cricoides de todos los especímenes

7. DISCUSIÓN

El presente estudio se propuso validar un flujo de trabajo integral para la obtención y caracterización de modelos tridimensionales de cartílagos laríngeos humanos, abarcando desde la preparación anatómica hasta la replicación física y la cuantificación de su fidelidad. Los resultados obtenidos confirman la viabilidad y robustez de la metodología desarrollada, al mismo tiempo que identifican fases críticas en el proceso de modelado 3D y resaltan la importancia de la estandarización para la comparabilidad de datos morfométricos. El desarrollo y la rigurosa aplicación de Protocolos Operativos Estandarizados (POEs) para la disección, escaneo y medición de los cartílagos laríngeos constituyeron un pilar fundamental en la metodología de este estudio, minimizando la variabilidad y garantizando la reproducibilidad (55,61).

7.1. Caracterización de la morfometría de los cartílagos laríngeos mediante observación directa y digital

La caracterización de los especímenes laríngeos, obtenida mediante la aplicación de protocolos de disección, escaneo y medición desarrollados, permitió evidenciar variaciones anatómicas que son de gran importancia en campos clínicos y educativos, que a menudo pasan desapercibidas. Nuestros resultados, derivados de la disección y análisis morfométrico de seis laringes humanas, revelaron una marcada variabilidad anatómica interindividual, desafiando la noción de una laringe "simétrica" y "estándar" (63).

Entre los hallazgos más relevantes se identificaron: asimetrías notorias en las astas superiores del cartílago tiroides (ej., espécimen 1.M.14: derecha 12.28 mm vs. izquierda 14.78 mm; espécimen 3.M.90: derecha 14.07 mm vs. izquierda 18.80 mm) que a menudo son subestimadas (100); deformidades de la lámina tiroidea que evocan condiciones como la microsomía hemilaríngea (ej., curvatura anómala en 1.M.14) (101,102); variantes anatómicas frecuentes como cartílagos tritíceos (descrito en el espécimen 1.M.14) y forámenes en la lámina tiroidea (referenciado en el espécimen 5.M.xx), relevantes por su posible alojamiento de estructuras neurovasculares (100,103); así como zonas de calcificación y fragilidad, consistentes con el proceso de osificación relacionado con la edad y el sexo (21,33,100). Se observó incluso un subdesarrollo bilateral de las astas superiores, aunque infrecuente, de importancia clínica por su asociación con disfagia u odinofagia (71,104).

Estos resultados, sumados a otras variantes descritas en la literatura (ej., apófisis posteriores simétricas del cartílago tiroides, ausencia de facetas cricotiroideas, hipertrofia del tubérculo tiroideo inferior, asimetría en la incisura tiroidea superior (100), inserciones variables de las cuerdas vocales verdaderas (34) y división del arco del cartílago cricoides por una membrana fibrosa (105), enfatizan la necesidad de habilidades avanzadas en disección y la aplicación de múltiples referencias anatómicas. La capacidad de caracterizar y visualizar estas variaciones en una emulación tridimensional constituye un aporte significativo.

El estudio de la morfometría laríngea ha sido un campo de estudio crucial para comprender dicha anatomía y sus implicaciones funcionales. A lo largo de la historia, diversos autores han abordado esta temática con objetivos variados, que abarcan desde la caracterización fundamental de estructuras cartilaginosas y referentes anatómicos (16,70), hasta la investigación aplicada en contextos clínicos y forenses. Por ejemplo, se ha analizado el comportamiento del cartílago tiroides en casos de estrangulación (26) y se ha explorado su utilidad como predictor de sexo biológico (74,76). Un objetivo recurrente ha sido la determinación del dimorfismo sexual y las

variaciones relacionadas con la edad en la laringe(9,44,45,47,61), buscando establecer diferencias en estructura, proporción y tamaño.

La diversidad metodológica y las características de las muestras en la literatura han limitado la comparabilidad de los estudios de morfometría laríngea. Esta heterogeneidad abarca desde los rangos de edad y poblaciones (ej., adultos postpuberales (43), rangos específicos como 40-60 años (8), o estudios en fetos y recién nacidos (59,79) que observan crecimiento lineal y dimorfismo incipiente), hasta la preparación y conservación de las muestras cadavéricas. Se han reportado variaciones significativas en el tiempo post-mortem (de 12-24 horas (9,45,61) a 64 horas (40) y en los métodos de fijación (formalina 10%) (7,11,16,44,46,49,55,74,76), salina con fosfato y antimicrobianos (106), uso de fenoxietanol (64) o crioconservación (87). De igual manera, las estrategias de disección varían, donde algunos estudios priorizan una limpieza mínima del tejido (45,47), mientras que otros, como el nuestro, buscan una remoción exhaustiva manteniendo la integridad de los cartílagos, un aspecto crítico para evitar fracturas, especialmente del cricoides (44,59,62).

Además de la caracterización general, un foco significativo ha sido la definición de puntos de referencia anatómicos clave (landmarks), especialmente aquellos con aplicabilidad en la cirugía laríngea (8,40,45), así como la ubicación de la comisura anterior (44,62,83) y las diferencias individuales para personalizar procedimientos quirúrgicos (87). La recopilación de datos morfométricos precisos ha sido fundamental para el desarrollo de instrumentos de visualización de vías respiratorias (39) y modelos clínicos (46).

La morfometría laríngea también se ha beneficiado de las técnicas de imagenología avanzada y la reconstrucción tridimensional (3D). La mayoría de los estudios utilizan imágenes DICOM (26) y software especializado como Mimics (v. 12.3) (26) para obtener modelos precisos a partir de tomografías computarizadas (TC) retrospectivas (8,43). Aunque poderosas, estas técnicas requieren estandarización en la adquisición (ej., CT scans multidetector, cortes de 0.9 mm) y procesamiento para asegurar la precisión y reducir sesgos (8,81).

Sin embargo, la dificultad de comparar directamente estos estudios radica en la heterogeneidad de sus metodologías, la selección de puntos antropométricos, los instrumentos de medición y la condición del espécimen (44). La *Tabla 18* evidencia la prevalencia de estudios en poblaciones europeas y asiáticas, reafirmando la limitación de datos en el continente americano (9). Además, la diversidad en la presentación de muestras (cadavéricas vs. imágenes de escáner) y los instrumentos de medición dificultan la estandarización y comparación de datos. Es por esto que el desarrollo de protocolos específicos, como los propuestos en nuestro estudio, permite cerrar dicha brecha.

		DIN 862 0-200/6, precisión de medición $\pm 0,1$ mm/0,01)							
Shin, et al. Korea (2009) (78)	Imágenes diagnósticas; TC	m-view 5.4, Marotech, Seoul, Korea	✓						
Kim, et al. Korea (2017) (46)	Muestras cadavéricas	Calibrador digital (Mitutoyo, Japón 0.01mm)	✓						
Glikson, et al. Israel (2017) (80)	Imágenes diagnósticas; TC	Picture archiving communication System (PACS) version 11.0	✓						✓
Sagiv, et al. Israel (2015) (81)	Imágenes diagnósticas;	Picture archiving communication System (PACS) version 11.0	✓						✓
Ajmani, Nigeria (1990) (82)	Muestras cadavéricas	Pie de rey Goniometro	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kovač, et al. Croacia (2010)(11)	Muestras cadavéricas	Pie de rey digital; precisión 0,03 mm Goniometro óptico; precisión 0,08°	✓						
Tellez, et al. Colombia (2016) (16)	Muestras cadavéricas	Calibrador digital Vernier Mitutoyo (Super Caliper-Solar Powered- Series 500-No battery or origin reset needed for IP67 Digital) (Resolución 0,01mm)	✓	✓			✓		✓
Hamdan, et al. Líbano (2020) (84)	Imágenes diagnósticas; RM	Philips Ingenia (Andover, Massachusetts) machine							✓
Shrestha, et al. Nepal (2024) (86)	Muestras cadavéricas	Digital sliding Vernier calipers		✓					
Fayoux, et al. Francia (2008) (79)	Muestras cadavéricas	Digital calliper (Mitutoyo, Japan; precisión 0,02 mm)	✓	✓	✓				✓
Gagnon et, al. Francia (2019) (26)	Imágenes diagnósticas; DICOM	Mimics1 v. 12.3	✓						
Watanabe, et al. Japon (1982) (10)	Muestras cadavéricas	-	✓						✓
Inamoto, et al. Japón (2015) (13)	Imágenes diagnósticas; TC	Software de medición del escáner							✓
Randestad et al. Sweden (2000) (39)	Muestras cadavéricas	Caliper 0,1 mm		✓					
Bakhshae, et al. Iran (2015) (83)	Muestras cadavéricas	Pie de rey	✓						✓
Mobashir, et al. Egipto (2018) (42)	Muestras cadavéricas	Caliper					✓		✓
Ara, et al. Bangladeshi (2022) (85)	Muestras cadavéricas	Caliper	✓						
Lopez-Sanchez, et al. España (2024) (87)	Muestras cadavéricas	Caliper Mitutoyo	✓						

Tabla 18. Trabajos realizados sobre morfometría laríngea *Otras mediciones

7.2. Obtención de modelos 3D cartílagos laríngeos humanos.

El presente estudio marcó un avance significativo en la caracterización morfométrica de cartílagos laríngeos humanos mediante la implementación de tecnología de escaneo tridimensional. Se utilizó un escáner de luz estructurada moderno (Shining 3D, EinScan Pro HD) con el objetivo de obtener modelos digitales de los cartílagos tiroideos y cricoides directamente desde los especímenes anatómicos. Esta aproximación demostró la viabilidad y precisión del escaneo 3D como una herramienta fundamental en la intersección de la anatomía clásica y las tecnologías biomédicas digitales.

La literatura ha explorado diversas técnicas para la reconstrucción tridimensional de estructuras laríngeas. Entre ellas, la tomografía computarizada (TC) de alta resolución ha sido ampliamente utilizada. Storck et al. (107) desarrollaron modelos laríngeos a partir de TC de laringes cadavéricas, concluyendo que, si bien la técnica es robusta para el estudio anatómico, la visualización de los cartílagos depende en gran medida de su grado de osificación, un factor influenciado por la edad y el sexo. A pesar de esta limitación, lograron identificar con éxito todas las estructuras relevantes.

Sin embargo, es crucial reconocer que algunas tecnologías de imagen pueden pasar por alto detalles anatómicos a pequeña escala, especialmente si el grado de osificación o la configuración superficial impiden una visualización adecuada. Por ejemplo, Johnson et al. (108) demostraron que ciertas fracturas internas en el cartílago cricoides, resultado de fuerzas externas, no son detectables mediante exploraciones radiológicas convencionales y requieren un análisis forense más exhaustivo para su identificación.

En contraste, el escáner de luz estructurada empleado en nuestro estudio ofrece ventajas considerables. Esta tecnología permite la captura de detalles morfológicos superficiales con alta resolución sin necesidad de contacto directo con el espécimen ni exposición a radiación. La aplicación de escáneres de luz estructurada en la caracterización de cartílagos laríngeos no se ha reportado extensamente en estudios anatómicos previos, lo que posiciona nuestra investigación como un aporte pionero al proponer un protocolo estandarizado para su uso en este campo.

La eficacia de esta tecnología se ha validado en otros contextos biomédicos. Instituciones como el Vanderbilt University Medical Center (Nashville, EE. UU.) han utilizado escáneres de luz estructurada (EinScan SP) para el análisis de muestras patológicas. En un estudio (109), se reconstruyó un tumor laríngeo a partir de imágenes preoperatorias para la planificación quirúrgica y el asesoramiento al paciente. Posteriormente, el tumor resecado fue escaneado, permitiendo una profundización en aspectos no identificados durante el procedimiento y mejorando la comprensión del diagnóstico para el paciente. Otro trabajo del mismo grupo (110) escaneó laringectomías totales y resecciones orales utilizando el mismo dispositivo y software EXScan (también empleado en nuestro estudio). Este equipo diseñó un protocolo riguroso que consideraba variables como el tiempo post-resección, la disposición de la muestra, el número de escaneos, la configuración del escáner y el control lumínico, destacando la necesidad de establecer directrices estrictas para obtener modelos digitales fotorrealistas y anatómicamente fieles.

La capacidad del escaneo 3D de luz estructurada para generar modelos digitales detallados y manipulables mejora significativamente la comprensión de las estructuras anatómicas tanto para cirujanos como para pacientes. A diferencia de las fotografías 2D convencionales, que ofrecen

una perspectiva estática, los archivos tridimensionales permiten explorar la geometría y el estado de los márgenes quirúrgicos con mayor claridad (109,110). Además, estos archivos digitales pueden almacenarse a largo plazo, preservando una representación casi real del espécimen incluso después de su descarte físico, lo que resulta invaluable para revisiones retrospectivas o análisis postoperatorios (110).

La obtención de modelos digitales anatómicamente precisos mediante escaneo 3D facilitó una visualización detallada de las estructuras laríngeas, superando limitaciones del estudio físico directo, como la fragilidad del cartílago o la dificultad para tomar múltiples mediciones sin alterar la muestra. Esta digitalización también posibilita su preservación indefinida y su distribución eficiente en entornos docentes y clínicos. Un hallazgo adicional relevante en nuestro estudio fue la identificación de estructuras anatómicas que no se evidencian en modelos tridimensionales comerciales estandarizados, resaltando el valor de la reconstrucción directa de especímenes humanos.

Una vez obtenidos los modelos digitales de los cartílagos laríngeos mediante escaneo 3D, el siguiente paso crucial en nuestro estudio fue su impresión física en resina utilizando una impresora 3D de fotopolimerización (Anycubic Photon M5S). Esta etapa demostró la viabilidad técnica de integrar procesos de escaneo e impresión como una estrategia eficaz para la fabricación de modelos anatómicos laríngeos de alta fidelidad, abriendo un campo relevante para la enseñanza, la investigación biomédica y la simulación clínica.

La fabricación de modelos 3D a partir de cartílagos laríngeos humanos se alinea con la tendencia actual de complementar los métodos tradicionales de enseñanza anatómica —como las proyecciones, disecciones y atlas— con herramientas digitales y físicas avanzadas. En este contexto, la impresión 3D, junto con la realidad aumentada (AR) y la realidad virtual (VR), se ha consolidado como un recurso invaluable (89). Los modelos impresos no solo facilitan la representación visual precisa de estructuras complejas, sino que también constituyen recursos accesibles y reutilizables, eliminando la necesidad de sustancias embalsamadoras como la formalina, que pueden generar aversión entre los estudiantes (22).

Diversos estudios han demostrado que los modelos 3D mejoran la precisión en la identificación de accidentes anatómicos y promueven una experiencia de aprendizaje más inmersiva y atractiva (22,89). La posibilidad de añadir coloraciones diferenciadas en las impresiones contribuye a representar con mayor claridad los límites estructurales, facilitando una transición pedagógica gradual del modelo artificial a la anatomía real (22) (93). No obstante, persisten limitaciones en cuanto a la simulación de la textura, densidad y resistencia propias de los tejidos humanos. Actualmente, no existe un material que reproduzca con total fidelidad todas las propiedades biomecánicas del cartílago laríngeo (89) (36), un aspecto que debe considerarse en el diseño de modelos para aplicaciones muy específicas.

El potencial de los modelos impresos en 3D se extiende más allá del aula, encontrando aplicaciones relevantes en contextos quirúrgicos, forenses y biomecánicos. Se han desarrollado modelos específicos para el entrenamiento en procedimientos como la laringoscopia, la cricotiroidotomía en pacientes obesos, la fonomicrocirugía endoscópica y la laringoplastia de medialización (25,91,92,111) . En el ámbito forense, se ha logrado replicar fracturas internas laríngeas causadas por compresión cervical mediante modelos flexibles que simulan patrones de craqueo observados en autopsias reales, aportando una herramienta didáctica valiosa para la identificación de lesiones ocultas (108). Asimismo, la impresión 3D se ha empleado para producir

modelos sintéticos del cartílago cricoides con propiedades físicas y mecánicas comparables a las del tejido humano, lo que ha facilitado el estudio del umbral de esfuerzo requerido para inducir fracturas (106).

En el presente trabajo, se optó por la impresión con resina fotopolimerizable, la cual demostró ser efectiva para la reproducción detallada de estructuras laríngeas. Otros estudios han explorado el uso de materiales como silicona, gelatina, resinas flexibles (Engineering LCD resin – Flex 82^a y 63^a de Form Futura), así como mezclas de polímeros, con el propósito de aproximarse a las propiedades biomecánicas del cartílago y crear modelos desmontables o funcionales para entrenamiento quirúrgico (25,108,111). La inclusión de colores, sistemas de anclaje y geometrías internas también ha permitido el diseño de modelos interactivos que se adaptan a distintas necesidades pedagógicas y clínicas.

Aunque este estudio no evaluó directamente la calidad pedagógica o clínica de los modelos obtenidos, la literatura respalda su utilidad como simuladores anatómicos con alto grado de fidelidad y efectividad. En estudios comparativos, los modelos 3D han alcanzado niveles similares de autoeficacia, fidelidad y valor educativo respecto a los modelos cadavéricos, siendo percibidos como herramientas motivadoras, innovadoras y esenciales para el futuro de la medicina (25,89). En particular, simuladores desarrollados para procedimientos como la cricotiroidotomía mostraron tasas de éxito incluso superiores en el primer intento al ser utilizados por residentes con poca experiencia (92). Estos resultados sugieren que la precisión estructural y la disposición anatómica de los modelos tridimensionales son suficientes para facilitar la adquisición de habilidades quirúrgicas esenciales.

Además de los beneficios en educación y entrenamiento, los modelos 3D ofrecen ventajas logísticas: son fáciles de almacenar, reproducir y adaptar en diferentes colores y escalas, a diferencia de los especímenes cadavéricos, cuya conservación es costosa y limitada en muchos contextos académicos (22). Esto los convierte en una solución viable y de bajo costo, especialmente en entornos con restricciones para el acceso a cuerpos humanos.

Finalmente, debe señalarse que el proceso de postprocesamiento es una etapa crítica para garantizar la calidad final del modelo impreso. En algunos estudios se ha documentado el uso de alcohol isopropílico y curado UV como parte del protocolo de acabado, lo cual influye directamente en la resistencia y el detalle superficial del modelo(25). En futuras investigaciones, sería pertinente estandarizar y reportar con mayor rigor estas variables, ya que impactan en la fidelidad morfológica de las estructuras reproducidas.

7.3. Validación de los modelos 3D generados con técnicas digitales y de medición directa.

Los resultados de nuestro estudio, obtenidos del análisis del modelo lineal mixto, proporcionan una visión detallada sobre la fidelidad morfométrica de los modelos digitales e impresos 3D de los cartílagos laríngeos en comparación con los especímenes cadavéricos originales. Estos hallazgos son fundamentales para validar la precisión de las réplicas y para identificar las fases del proceso que introducen la mayor distorsión.

Observamos diferencias significativas en el comportamiento de la distorsión entre el cartílago tiroideos y el cricoides. Para el cartílago tiroideos, los análisis post-hoc indicaron que la digitalización inicial fue la principal fuente de distorsión. Esto se atribuye a su morfología más compleja y a la presencia de irregularidades, asimetrías y calcificaciones, que pueden dificultar un escaneo y una

segmentación uniformes. La tendencia a la sobreestimación o subestimación en ciertas mediciones del tiroides digital podría estar relacionada con el umbral de segmentación utilizado en el software, que pudo haber capturado tejidos blandos adyacentes o haber sobredimensionado/subdimensionado los bordes del cartílago.

En contraste, el cartílago cricoides mostró una mayor equivalencia entre las mediciones cadavéricas y las digitales. Su morfología más regular y compacta, con menos variaciones interindividuales en comparación con el tiroides, probablemente facilitó una digitalización más precisa.

Un aspecto crítico y positivo de nuestros hallazgos es la alta fidelidad de la impresión 3D respecto al modelo digital. Las pruebas no revelaron diferencias significativas entre las mediciones obtenidas del modelo digital 3D y su réplica impresa. Esto sugiere que, una vez que se obtiene un modelo digital preciso, la tecnología de impresión 3D utilizada (Anycubic Photon M5S con resina fotopolimerizable) es altamente confiable para replicar fielmente esa geometría. Sin embargo, es importante recalcar que cualquier error o distorsión introducida durante la fase de digitalización se trasladará directamente al modelo impreso. Por lo anterior se requiere que el proceso de disección sea limpio de tal forma que el escaneo pueda obtener un modelo tridimensional sin necesidad de realizar un posprocesamiento amplio que elimine procesos que muchas veces son esenciales

La capacidad de nuestro protocolo para generar modelos con esta fidelidad tiene implicaciones directas para la aplicabilidad de los modelos impresos. Si bien la fase de digitalización puede introducir cierta distorsión en cartílagos de morfología compleja como el tiroides, la precisión en la replicación física de los modelos digitales sugiere que son altamente confiables para propósitos educativos y de simulación básica. Para aplicaciones que demanden una precisión submilimétrica, como el diseño de implantes personalizados o la planificación quirúrgica de alta complejidad, se requeriría una optimización aún mayor del proceso de digitalización y validaciones de precisión que superen las distorsiones inherentes a las etapas iniciales. La elección de puntos de referencia anatómicos (landmarks) es un factor crítico en esta cuantificación, y la marcada variabilidad en su definición entre estudios (*Tablas 19 y 20*) subraya la importancia de protocolos estandarizados para asegurar la comparabilidad y la precisión de las mediciones de fidelidad. Adicional a esto se resalta la necesidad del uso de una terminología anatómica clara que se alinee a los lineamientos de la FIPAT

Estudio	PL.c	ITS.c	ITI.c	CA	AS.p	AS.r	Al.r	Al.p	BP.t.c	TS.c
Rivera et al (2025)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Saldarriaga-Tellez, et al. (2016) (16)		x			Asta superior					
Gangon et al (2019) (26)		x	x		x	x	x	x		x
Pereira et al (2014) (9)	x	x	x	x						
Kovač et al (2010) (11)	Lamina				Asta superior		Asta inferior			
Şahin et al (2023) (8)		x	x	x						
Dereli et al (2020) (47)		x	x							

Enver et al (2018) (45)		x	x	x						
Sprinzl et al(1999) (40)		x	X	x						
Savitha et al (2019) (7)	x		x			x				
Vadgaonkar et al (2024) (21)	Lamina (altura, ancho, grosor)									
Bilgen et al (2024)(64)	x				x	x	x	x		
Cicekcibasi et al (2008) (59)		x	x		Asta superior	x	x	Asta inferior		
Ortug et al (2020) (62)		x	x	x						
(Fayoux, et al (2008) (79)	Lamina (altura, ancho, grosor)									
Cameriere et al. (2021) (76)		x	x		X	X	x	x	x	
Poletaeva et al (2017) (74)		x	x		x	x	x	x	x	
Wysocki et al (2008) (44)	Lamina				Asta superior		Asta inferior			
Bakhashaee et al. (2016) (83)		x	x	x						
Enver et al (2021) (61)		x	x	x					x	
Sagiv et al (2016) (81)		x		x						
Eckel et al (1994) (70)					Asta superior		Asta inferior			
Sahoo et al (2023) (55)		x	x							

Tabla 19 Designación de diferentes puntos landmarks en los estudios morfométricos del cartílago tiroides. **PL.c**: centro de la prominencia laríngea. **ITS.c**: centro de incisura tiroidea superior. **ITI.c**: centro de incisura tiroidea inferior. **CA**: comisura anterior. **AS.p**: punta de la asta superior. **AS.r**: raíz de la asta superior. **Al.r**: raíz de la asta inferior. **Al.p**: punta de la asta inferior. **BP.t.c**: centro del borde posterior. **TS.c**: centro del tubérculo superior

Para el cartílago tiroides se presenta una variabilidad en la asignación de puntos de referencia, la tabla 32 revela que mientras algunos landmarks son recurrentes, otros son específicos de ciertos estudios o se definen de manera diferente:

Incisura tiroidea superior e Incisura tiroidea inferior (ITS.c, ITI.c): Son consistentemente los más utilizados, apareciendo en la mayoría de los estudios. Esto sugiere que la incisura tiroidea superior e inferior son puntos de referencia universalmente reconocidos debido a su prominencia. *Comisura Anterior (CA)*: Es otro landmark frecuentemente empleado, siendo un punto de interés quirúrgico vital. Algunos autores, para definir su ubicación de manera exacta, han recurrido a métodos invasivos como la inserción de agujas desde la endolaringe a través del cartílago (9,40,45,62,83), lo que subraya la importancia de su precisión para procedimientos como la tiroplastia de medialización de Montgomery, donde el tubérculo inferior también es un punto de referencia crucial (87).

Astas Superiores (AS.p, AS.r) e Inferiores (Al.p, Al.r): Aunque la medición de las astas es común, la tabla muestra variabilidad en si se mide la punta (p) o la raíz (r), o simplemente se menciona la "asta superior" o "inferior" de forma general. Este es un aspecto que debe considerarse ya que

como se menciono previamente en esta estructura se pueden presentar diferentes variaciones. Por otro lado es muy común el uso del temino cuernos para esta estructura, algo que no responde a los lineamientos del FIPAT.

Lámina: Algunos estudios se centran en las dimensiones generales de la lámina tiroidea (altura, ancho, grosor) proporcionando una caracterización global del cartílago.

Otros landmarks como el *centro de la prominencia laríngea (PL.c)*, el *centro del tubérculo superior (TS.c)*, o el *centro del borde posterior (BP.t.c)* son menos recurrentes, que aunque indirectamente son puntos que se determinan para caracterizar la lámina, podría indicar una dificultad en su ubicación y definición precisa.

Estudio	AR.s	PC.p	TC.c	CM.s	CM.i	c.SA.a.c	c.SA.t.c
Rivera et al (2025)	x	x	x	x	x	x	x
Dereli et al (2020) (47)	Arco			Lamina			
Sprinzl et al(1999) (40)	Arco			Lamina		x	x
Bilgen et al (2024)(64)	Arco			Lamina			
	Diámetro anteroposterior			Diámetro transversal			
Cicekcibasi et al (2008) (59)	Arco			Lamina		x	x
Joshi et al (2011) (49)	Arco			Lamina		x	x
	Diámetro anteroposterior			Diámetro transversal			
Kim et al (2017) (46)	Arco			Lamina			
	Diámetro anteroposterior			Diámetro transversal			
(Fayoux, et al (2008) (79)	Arco			Lamina			
	Diámetro anteroposterior			Diámetro transversal			
Zolotenkova et al (2021) (75)	Arco			Lamina		x	x
	Diámetro anteroposterior			Diámetro transversal			
Randestad et al. (2000) (39)	Arco			Lamina		x	x
	Diámetro anteroposterior			Diámetro transversal			
Wysocki et al (2008) (44)	Arco			Lamina		x	x
	Diámetro anteroposterior			Diámetro transversal			
Eckel et al (1994) (70)	Arco			Lamina			
	Diámetro anteroposterior			Diámetro transversal			

Tabla 20 Designación de diferentes puntos landmarks en los estudios morfométricos del cartílago cricoides. AR.s: punto superior del arco. PC.p: punta del pico del cricoides. TC.c: centro de tubérculo cricoideo. CM.s: punta superior de la cresta mediana. CM.i: punta inferior de la cresta mediana. c.SA.a.c: Centro de superficie articular del aritenoides. c.SA.t.c: Centro de superficie articular del tiroides

Para el cartílago cricoides, la variabilidad se manifiesta de manera similar:

Arco y Lámina: La mayoría de los estudios se enfocan en las dimensiones generales del arco y la lámina. Esto se debe a que estas dos partes constituyen las principales porciones del cricoides.

Diámetros: Las mediciones de diámetro anteroposterior y transversal son comunes, esenciales para comprender las dimensiones de la vía aérea a este nivel.

Otros landmarks, como el *centro del tubérculo cricoideo (TC.c)* [42,48,72,76,78] o *las puntas superior e inferior de la cresta mediana (CM.s, CM.i)*, son poco utilizados en las investigaciones.

Superficies Articulares: Las superficies articulares del cricoides (*c.SA.a.c para el aritenoides y c.SA.t.c para el tiroides*) son de interés específico en algunos trabajos, debido a su relevancia en la biomecánica laríngea.

En conclusión, nuestros resultados cuantitativos respaldan la viabilidad de utilizar escaneo 3D para la morfometría laríngea, destacando la necesidad de optimizar los protocolos de digitalización para cartílagos de morfología irregular. La fidelidad de la impresión 3D valida esta fase como una herramienta robusta para la replicación de modelos digitales, abriendo puertas a diversas aplicaciones biomédicas. La documentación de un pronunciado dimorfismo sexual y asimetrías intrínsecas en los cartílagos laríngeos es crucial, enfatizando la necesidad de una personalización en los enfoques clínicos y quirúrgicos y en la interpretación de los datos en contextos forenses. Esta comprensión de la complejidad anatómica es fundamental para mejorar la precisión diagnóstica y la eficacia de las intervenciones.

8. CONCLUSIONES

La presente investigación no solo confirmó la viabilidad y precisión del modelado tridimensional de cartílagos laríngeos humanos a partir de análisis morfométrico en el campo de las ciencias biomédicas, sino que también estableció y validó un proceso integral para ello. Para responder a la pregunta fundamental de cuál es el proceso para modelar tridimensionalmente cartílagos laríngeos humanos a partir de análisis morfométrico, se delineó una secuencia metodológica rigurosa.

Este proceso, desarrollado de acuerdo a nuestros objetivos, implicó en primer lugar una exhaustiva caracterización morfométrica, que fue esencial para entender la marcada variabilidad de la anatomía de la laringe y definir sus particularidades. Este análisis inicial abarcó la identificación de asimetrías, deformidades, variantes anatómicas frecuentes, así como zonas de calcificación y fragilidad. Porque unos cartílagos son iguales y otros no, y esto es fundamental para reconocer las diferencias interindividuales, la adecuada preparación y conservación de las muestras cadavéricas fueron pasos críticos, empleando una disección subpericondrial meticulosa para asegurar una extracción limpia y completa de los cartílagos, un enfoque que se diferencia de métodos que pueden resultar en fracturas o limpieza incompleta.

Para obtener los modelos 3D con alta fidelidad, fue necesario no solo un cuidadoso escaneo de luz estructurada y procesamiento digital, sino también una atención primordial a la conservación de las muestras y al abordaje de la heterogeneidad metodológica. Esta aproximación superó los desafíos inherentes a las técnicas tradicionales, como la variabilidad en rangos de edad, tiempo post-mortem, métodos de fijación, selección de puntos antropométricos e instrumentos de medición, factores que a menudo limitan la comparabilidad de estudios previos en la literatura. Los modelos digitales resultantes sirvieron de base para la impresión aditiva, creando réplicas físicas de gran precisión.

El éxito en la creación de estos modelos 3D precisos, al ser el objetivo principal, dependió críticamente de la estandarización rigurosa de la disección y la conservación de las muestras, junto con un procesamiento digital minucioso. Aunque el proceso demostró una fidelidad morfológica global aceptable, particularmente en el cartílago cricoides (con distorsiones promedio inferiores al 9%), el cartílago tiroides exhibió una mayor variabilidad y niveles de distorsión más elevados (alcanzando hasta un 18% en algunos especímenes). La tendencia sistemática a la sobreestimación dimensional observada en el cartílago tiroides sugiere que la etapa de escaneo y segmentación representa el principal desafío técnico en el flujo de trabajo. Por otro lado, la ausencia de un patrón uniforme en las distorsiones del cricoides indica que factores anatómicos individuales también inciden en la precisión final. En conjunto, estos hallazgos evidencian que, si bien el método propuesto es reproducible y clínicamente viable, requiere ajustes técnicos específicos para garantizar una mayor precisión, especialmente en estructuras anatómicamente más complejas como el cartílago tiroides.

Desde una perspectiva educativa, los modelos obtenidos, tanto físicos como digitales, se consolidan como recursos didácticos de valor incalculable para la enseñanza de estructuras anatómicas de difícil acceso como las laríngeas. Superando a los métodos tradicionales, estas tecnologías de fabricación digital permiten la incorporación de aspectos como textura, color y propiedades táctiles, enriqueciendo significativamente la experiencia de aprendizaje. Este estudio, al sentar las bases para futuras investigaciones en biomodelación y cirugía laríngea, abre un abanico de aplicaciones potenciales en contextos clínicos, educativos y forenses. La

metodología empleada, al ser replicable en otras regiones anatómicas, fortalece el vínculo entre la anatomía clásica y las herramientas digitales de nueva generación, promoviendo así una integración innovadora y efectiva entre el conocimiento anatómico y las tecnologías emergentes.

9. RECOMENDACIONES

A pesar de los importantes hallazgos y el éxito en el desarrollo de un protocolo de escaneo e impresión 3D de cartílagos laríngeos, el presente estudio presenta ciertas limitaciones que, no obstante, delinean valiosas vías para futuras investigaciones. La principal limitación radica en el número de especímenes laríngeos analizados; una muestra más amplia no solo fortalecería la validez estadística de los resultados, sino que también permitiría una comprensión más profunda de las variaciones morfométricas en función del sexo, la edad y las particularidades poblacionales.

Asimismo, si bien la resina fotopolimerizable utilizada en este estudio demostró ser efectiva para la reproducción detallada de la morfología, persisten limitaciones en la simulación de las propiedades físicas y biomecánicas inherentes a los cartílagos laríngeos, como su textura, elasticidad y respuesta táctil. En consecuencia, futuras investigaciones deberían explorar la aplicación de diversos materiales de impresión 3D que permitan replicar con mayor fidelidad estas características, lo que mejoraría significativamente la aplicabilidad de los modelos anatómicos en contextos de simulación clínica y enseñanza avanzada.

Para abordar estas limitaciones materiales, se recomienda clasificar las estructuras laríngeas según su naturaleza, diferenciando entre estructuras duras (como el cartílago tiroides o cricoides) y blandas (como la epiglotis o los tejidos conectivos asociados). Esta clasificación facilitaría la selección de materiales de impresión más adecuados para cada componente, optimizando tanto la fidelidad como la funcionalidad de los modelos. Esta aproximación ha demostrado ser exitosa en otros estudios, como el realizado en Irlanda (93), donde se desarrollaron múltiples combinaciones de modelos anatómicos a partir de una amplia gama de piezas y materiales, obteniendo representaciones más precisas y funcionales.

Finalmente, para maximizar el valor de estos biomodelos, resulta imperativo profundizar en la simulación de sus propiedades biomecánicas. La producción de modelos que no solo representen la forma, sino también las propiedades mecánicas de los cartílagos –tales como su resistencia a la deformación o su comportamiento bajo estrés–, aportaría un valor adicional considerable para el diseño de dispositivos biomédicos personalizados y el entrenamiento quirúrgico realista. Abordar estas vías de investigación no solo potenciará la precisión y funcionalidad de los biomodelos laríngeos, sino que consolidará el papel de las tecnologías 3D en la investigación anatómica y las aplicaciones clínicas.

10. CONFLICTO DE INTERESES

El autor declara que no existe conflicto de intereses. El acceso a laboratorios y equipos fue facilitado por la Universidad del Valle, sin que ello implicara influencia sobre los resultados o las conclusiones del estudio.

11. REFERENCIAS

1. Latarjet Michel, Ruiz Liar Alfredo. Anatomía Humana. 5ta°. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Medica Panamericana; 2019.
2. Céruse P, Ltaief-Boudrigua A, Buiret G, Cosmidis A, Tringali S. Anatomía descriptiva, endoscópica y radiológica de la laringe. EMC - Otorrinolaringología [Internet]. 2012;41(3):1–26. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1632347512626824>
3. Ocakoglu G, Ercan I. Traditional and Modern Morphometrics: Review. *Turkiye Klinikleri Journal of Biostatistics* [Internet]. 2013;5:37–41. Available from: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55211578>
4. Viviana Toro Ibacache M, Manriquez Soto G, Suazo Galdames I. Morfometría Geométrica y el Estudio de las Formas Biológicas: De la Morfología Descriptiva a la Morfología Cuantitativa. Vol. 28, Int. J. Morphol. 2010.
5. Slice DE. Geometric Morphometrics. *Annu Rev Anthropol* [Internet]. 2007 Jan 1;36:261–81. Available from: <https://bd.univille.edu.co/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsjsr&AN=edsjsr.25064956&lang=es&site=eds-live>
6. Salamanca-Carreño A, Parés-Casanova PM, Vélez-Terranova M, Monroy-Ochoa NI. Assessment of Formalin-Fixed Bovine Larynx Asymmetry Using Geometric Morphometry. *The Scientific World Journal* [Internet]. 2025 Jan 1;2025(1):8386223. Available from: <https://doi.org/10.1155/tswj/8386223>
7. Savitha V, Menasinkai SB. MORPHOMETRIC STUDY OF THYROID CARTILAGES IN ADULTS BY DISSECTION METHOD. *International Journal of Anatomy and Research*. 2019 Jul 1;7(3):6824–9.
8. Şahin A, Gündoğmuş CA, Üçkuyulu Eİ, Oysu Ç, Enver N. Laryngeal Framework Surgical Anatomy: A Radiological Study. *Journal of Voice* [Internet]. 2023;37(5):801.e9-801.e15. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089219972100148X>
9. Jotz GP, Stefani MA, Pereira Da Costa Filho O, Malysz T, Soster PR, Leão HZ. A morphometric study of the larynx. *Journal of Voice*. 2014;28(6):668–72.
10. Watanabe H, Kurihara K, Murai T. A Morphometrical Study of Laryngeal Cartilages. *Med Sci Law* [Internet]. 1982 Oct 1;22(4):255–60. Available from: <https://doi.org/10.1177/002580248202200406>
11. Kovač T, Popović B, Marjanović K, Wertheimer V, Kovačević M, Nikolić V, et al. Morphometric characteristics of thyroid cartilage in people of Eastern Croatia. *Coll Antropol* [Internet]. 2010 [cited 2023 Nov 8];34(3):1069–73. Available from: <https://hrcak.srce.hr/file/89537>
12. Jadav D, Shedje R, Kanchan T, Meshram V, Garg PK, Krishan K. Age related changes in thyroid and cricoid cartilages: An autopsy based radiological analysis. *J Forensic Leg Med* [Internet]. 2022;85:102299. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1752928X21001840>
13. Inamoto Y, Saitoh E, Okada S, Kagaya H, Shibata S, Baba M, et al. Anatomy of the larynx and pharynx: Effects of age, gender and height revealed by multidetector computed tomography. *J Oral Rehabil*. 2015;42(9):670–7.
14. Yamasaki R, Behlau M, Brasil O de OC do, Yamashita H. MRI Anatomical and Morphological Differences in the Vocal Tract Between Dysphonic and Normal Adult

- Women. *Journal of Voice* [Internet]. 2011;25(6):743–50. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892199710001591>
15. Mau T. Three-Dimensional Morphometric Analysis of Cricoarytenoid Subluxation. *Journal of Voice* [Internet]. 2012 Mar 1;26(2):133–6. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2010.12.004>
 16. Tellez BS, Gómez EGC, Niño OJ, Porras PLF. Asymmetry of laryngeal ventricle. A direct anatomical study in cadavers | Asimetría del ventrículo laríngeo. Un estudio anatómico directo en material cadavérico. *International Journal of Morphology*. 2016;34(3):1092–6.
 17. Rodríguez-Hernandez J, Reinecke H. Aplicaciones biomédicas actuales de la impresión 3D y fabricación aditiva. Vol. 119.
 18. MIGUELEZ GARCIA M, DOMINGUEZ SOMONTE M. MODELING OF NATURAL ELEMENTS WITH SMART MATERIALS THROUGH ADDITIVE MANUFACTURING. *Dyna (Medellin)*. 2021 Feb 9;96(1):30–4.
 19. Haleem A, Javaid Mohd. 3D scanning applications in medical field: A literature-based review. *Clin Epidemiol Glob Health* [Internet]. 2019 Jun 1;7(2):199–210. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2018.05.006>
 20. Bois MC, Morris JM, Boland JM, Larson NL, Scharrer EF, Aubry MC, et al. Three-Dimensional Surface Imaging and Printing in Anatomic Pathology. *J Pathol Inform* [Internet]. 2021;12(1):22. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2153353922001444>
 21. Vadgaonkar R, Rai AR, Kumar CG, Murlimanju BV, Pai MM, Prabhu L V., et al. Morphometry of the thyroid cartilage, epiglottis and piriform sinus: An anatomical study. *F1000Res*. 2024 Feb 19;13:115.
 22. Garas M, Vaccarezza M, Newland G, McVay-Doornbusch K, Hasani J. 3D-Printed specimens as a valuable tool in anatomy education: A pilot study. *Annals of Anatomy*. 2018 Sep 1;219:57–64.
 23. Júnior JFN, Hermann DR, dos ReisAmérico R, Filho ISB, Stamm AEC, Pignatari SSN. A brief history of otorhinolaryngology: otology, laryngology and rhinology. *Braz J Otorhinolaryngol* [Internet]. 2007;73(5):693–703. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1808869415301324>
 24. Lydiatt DD, Bucher GS. The historical Latin and etymology of selected anatomical terms of the larynx. Vol. 23, *Clinical Anatomy*. 2010. p. 131–44.
 25. Chandna M, Siddiqui S, Bertoni D, Sakkal M, Belko S, Boon M, et al. Comparing cadaveric and 3D-printed laryngeal models in transcutaneous injection laryngoplasty. *Laryngoscope Investig Otolaryngol*. 2024 Aug 1;9(4).
 26. Gagnon C, Boismery S, Godio-Raboutet Y, Tuchtan L, Bartoli C, Adalian P, et al. Biomechanical study of the thyroid cartilage: A model of bi-digital strangulation. *Forensic Sci Int*. 2019 Sep 1;302.
 27. McCullagh KL, Shah RN, Huang BY. Anatomy of the Larynx and Cervical Trachea. *Neuroimaging Clin N Am* [Internet]. 2022;32(4):809–29. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S105251492200065X>
 28. Federative International Programme for Anatomical Terminology. FIPAT. *Terminologia Anatomica*. 2nd ed. FIPAT.library.dal.ca. 2019.
 29. Kitamura K, Watanabe T, Yamamoto M, Ishikawa N, Kasahara N, Abe S, et al. A Newly Discovered Tendon Between the Genioglossus Muscle and Epiglottic Cartilage Identified by Histological Observation of the Pre-Epiglottic Space. *Dysphagia*. 2023 Feb 1;38(1):315–29.

30. Gilroy AM, MacPherson BR, Ross LM, Schünke Michael, Schulte Erik, Schumaker Udo, et al. Prometheus : Atlas de Anatomía. 2ª ed. Atlas de anatomia : Prometheus. Buenos Aires [etc.] ; Médica Panamericana; 2013.
31. Garrido C, Salomón G‡, Flores Hernández S. Diferencias anatomofuncionales y endoscópicas entre la vía aérea del niño y la del adulto. REVISTA DEL INSTITUTO NACIONAL DE ENFERMEDADES RESPIRATORIAS ISMAEL COSÍO VILLEGAS [Internet]. 2007;20(2). Available from: www.iner.gob.mx142
32. The International Federation of Associations of Anatomists (IFAA) and The Federative Committee of Anatomical Terminology (FCAT). Terminologia Anatomica - International Anatomical Terminology (Traducción al español). 1st ed. Madrid: Editorial Medica Panamericana; 2001.
33. Ma Y, Shi J, Li Z jun, Wang X. Thyroid cartilage calcification and ossification in two specimens. Vol. 45, Asian Journal of Surgery. Elsevier (Singapore) Pte Ltd; 2022. p. 1940–1.
34. Sturm A, Chaiet SR. Chondrolaryngoplasty—Thyroid Cartilage Reduction. Vol. 27, Facial Plastic Surgery Clinics of North America. W.B. Saunders; 2019. p. 267–72.
35. Prades JM, Peoc'h M, Petcu C, Karkas A, Dumollard JM, Gavid M. The anterior commissure of the human larynx revisited. Surgical and Radiologic Anatomy. 2017 Aug 1;39(8):871–6.
36. Gawlikowska-Sroka A, Miklaszewska D, Dzieciolowska-Baran E, Kamienska E, Sroczynski T, Poziomkowska-Gesicka I. Changes of laryngeal parameters during intrauterine life. Eur J Med Res [Internet]. 2010;15(2):41. Available from: <https://doi.org/10.1186/2047-783X-15-S2-41>
37. Huang BY, Solle M, Weissler MC. Larynx: Anatomic Imaging for Diagnosis and Management. Vol. 45, Otolaryngologic Clinics of North America. 2012. p. 1325–61.
38. Anand V, Sharma H, Sethi A, Sahoo S. Morphometric analysis of human cricoid cartilage: a cadaveric study. International Journal of Otorhinolaryngology and Head and Neck Surgery. 2017 Dec 22;4(1):63.
39. Randestad Å, Lindholm CE, Fabian P. Dimensions of the Cricoid Cartilage and the Trachea. Laryngoscope [Internet]. 2000 Nov 1;110(11):1957–61. Available from: <https://doi.org/10.1097/00005537-200011000-00036>
40. Sprinzl GM, Eckel HE, Sittel C, Pototschnig C, Koebke J. Morphometric measurements of the cartilaginous larynx: An anatomic correlate of laryngeal surgery. Head Neck [Internet]. 1999 Dec 1;21(8):743–50. Available from: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0347\(199912\)21:8<743::AID-HED10>3.0.CO](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0347(199912)21:8<743::AID-HED10>3.0.CO)
41. Wilson I, Stevens J, Gnananandan J, Nabeebaccus A, Sandison A, Hunter A. Triticeal cartilage: the forgotten cartilage. Surgical and Radiologic Anatomy. 2017 Oct 1;39(10):1135–41.
42. Mobashir MK, Mohamed AERS, Quriba AS, Anany AM, Hassan EM. Linear Measurements of Vocal Folds and Laryngeal Dimensions in Freshly Excised Human Larynges. Journal of Voice. 2018 Sep 1;32(5):525–8.
43. Riede T, Stein A, Baab KL, Hoxworth JM. Post-pubertal developmental trajectories of laryngeal shape and size in humans. Sci Rep [Internet]. 2023;13(1):7673. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34347-w>
44. Wysocki J, Kielska E, Orszulak P, Reymond J. Measurements of pre- and postpubertal human larynx: a cadaver study. Surgical and Radiologic Anatomy [Internet]. 2008;30(3):191–9. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00276-008-0307-8>

45. Enver N, Doruk C, Kara E, Ashyüksel H, Başaran B. A morphometric analysis of laryngeal anatomy: a cadaveric study. *The Turkish Journal of Ear Nose and Throat*. 2018;28(2):71–7.
46. Kim IS, Song CH. Morphometric Study of Cricoid Cartilage in Korean. *kjpa* [Internet]. 2017 Jan 20;30(1):15–20. Available from: <http://dx.doi.org/10.11637/kjpa.2017.30.1.15>
47. Dereli AK, Acar K, Kutlu E, Sahin B. Evaluation of the relationship between anthropometric measurements of thyroid cartilage, cricoid cartilage, sex and stature: An autopsy study. *Romanian Journal of Legal Medicine*. 2019;27(3):258–63.
48. Jain M, Dhall U. Morphometry of the Thyroid and Cricoid Cartilages in Adults on C.T. Scan. *Journal of Anatomical Society of India* [Internet]. 2010;59(1):19–23. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000327781080005X>
49. Joshi MM, Joshi SS, Joshi SD. Morphometric study of cricoid cartilages in Western India. *Australas Med J* [Internet]. 2011;4 10:542–7. Available from: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:1674896>
50. J.D R, V.B K, B.D D, H.R J. Morphometric Study Of Thyroid Cartilage In Indian Cadavers: Morphometric Study Of Thyroid Cartilage In Indian Cadavers. *Natl J Integr Res Med* [Internet]. 2014 Apr 30;5(3):43–7. Available from: <http://nicpd.ac.in/ojs-/index.php/njirm/article/view/732>
51. Singla RK, Kaur R, Laxmi V. MORPHOLOGY AND MORPHOMETRY OF ADULT HUMAN CRICOID CARTILAGE: A CADAVERIC STUDY IN NORTH INDIAN POPULATION. *International Journal of Anatomy and Research* [Internet]. 2015 Mar 31;3(1):910–4. Available from: <http://www.ijmhr.org/ijar.3.1/IJAR.2015.109.html>
52. Patel S, Bhardwaj R, Parmar P, Vaniya V. Morphometric characteristic of thyroid cartilage in Gujarat region - A cadaveric study. *J Res Med Dent Sci*. 2016;4(2):150.
53. Poornima GC, K.R D. A STUDY OF MORPHOMETRY OF ADULT HUMAN LARYNX AND ITS IMPORTANCE IN CLINICAL APPLICATIONS. *International Journal of Anatomy and Research* [Internet]. 2017 Apr 30;5(2.1):3713–7. Available from: <https://www.ijmhr.org/IntJAnatRes/IJAR.2017.155>
54. Subramanyam S, Singh D, Bansal YS, Mandal SP. Determination of stature from anthropometric measurements of thyroid cartilage in the population of Punjab. *Indian Journal of Forensic Medicine and Toxicology*. 2020 Jan 1;14(1):67–76.
55. Sahoo S, Joshi H. Dimensions of Thyroid Cartilage Window for Medialisation Thyroplasty in Indian Population. *Indian Journal of Otolaryngology and Head and Neck Surgery*. 2023 Sep 1;75(3):1542–5.
56. Kotian SR, Nayak V, Sylvan A, Souza AD. Morphology of Human Larynx: an Anatomical Study. Vol. 39, *Cukurova Medical Journal*. 2014.
57. Sahoo S, Mallick A, Sethi A, Joshi H, Ghotra A. Morphometric cadaveric analysis of thyroid cartilage in Indian adults with comparative review of studies on other ethnic population. *International Journal of Otorhinolaryngology and Head and Neck Surgery*. 2021 Jan 25;7(2):287.
58. Cinar U, Yigit O, Vural C, Alkan S, Kayaoglu S, Dadas B. Level of vocal folds as projected on the exterior thyroid cartilage. *Laryngoscope* [Internet]. 2003 Oct 1;113(10):1813–6. Available from: <https://doi.org/10.1097/00005537-200310000-00028>
59. Cicekcibasi AE, Keles B, Uyar M. The morphometric development of the fetal larynx during the fetal period. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol* [Internet]. 2008;72(5):683–91. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165587608000773>

60. Sesen NA, Ortug A, Ortug G. A dissection based study of the dimensions of the thyroid cartilage in Anatolian population. *Italian Journal of Anatomy and Embryology* [Internet]. 2019 May 27;123(3):297–303. Available from: <https://oajournals.fupress.net/index.php/ijae/article/view/1672>
61. Enver N, Doruk C, Kara E, Kaşali K, Asliyukse H, Basaran B. Does Size Matter in Laryngology? Relation Between Body Height and Laryngeal Morphometry. *Journal of Voice* [Internet]. 2021 Mar 1;35(2):291–9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2019.08.001>
62. Ortug G, Liman Z, Ortug A. A Dissectional Study of the Level of Anterior Commissure of the Larynx. *Ear Nose Throat J*. 2021 Dec 1;100(10_suppl):983S-988S.
63. Özeren Keşkek C, Aytuğar E. 3D morphometric analysis of the epiglottis using CBCT: age and gender differences. *BMC Med Imaging*. 2024 Dec 1;24(1).
64. Bilgen S, Dogan M, Eren B, Inanir NT, Fedakar R, Erdogan D. Morphometric examination of the larynx in Turkish population [Internet]. 2024. Available from: <https://www.researchsquare.com/article/rs-4542271/v1>
65. Kahane JC. A morphological study of the human prepubertal and pubertal larynx. *American Journal of Anatomy* [Internet]. 1978 Jan 1;151(1):11–9. Available from: <https://doi.org/10.1002/aja.1001510103>
66. Meiteles LZ, Lin PT, Wenk EJ. An anatomic study of the external laryngeal framework with surgical implications. In: *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*. 1992. p. 235–40.
67. Tayama N, Kaga K, Chan RW, Titze IR. GEOMETRIC CHARACTERIZATION OF THE LARYNGEAL CARTILAGE FRAMEWORK FOR THE PURPOSE OF BIOMECHANICAL MODELING. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 2001.
68. Armin BB, Head C, Berke GS, Chhetri DK. Useful Landmarks in Arytenoid Adduction and Laryngeal Reinnervation Surgery. *Laryngoscope* [Internet]. 2006 Oct 1;116(10):1755–9. Available from: <https://doi.org/10.1097/01.mlg.0000233524.36309.5a>
69. Eckel HE, Sittel C. Morphometry of the larynx in horizontal sections. *Am J Otolaryngol* [Internet]. 1995;16(1):40–8. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/019607099590008X>
70. Eckel HE, Sittel C, Zorowka P, Jerke A. Dimensions of the laryngeal framework in adults. *Surgical and Radiologic Anatomy* [Internet]. 1994;16(1):31–6. Available from: <https://doi.org/10.1007/BF01627918>
71. Winzek CF, Hartrampf LCM, Kampschulte M, Pons-Kühnemann J, Birngruber CG, Dettmeyer R, et al. Unilateral and bilateral agenesis of the upper thyroid horns — A morphometric analysis of the larynx. *Forensic Sci Int*. 2019 Aug 1;301:225–30.
72. Jotz G, Leão H, Pereira O, Fisch P, Coelho R, Cervantes O. The asymmetry index of the cricoid cartilage and the external angle of the thyroid cartilage. A sex-related study.
73. R Lima LF, Nita LM, S Campelo VE, Imamura R, Tsuji DH. Morphometric Study on the Anatomy of the Fetal Cricoid Cartilage and Comparison Between Its Inner Diameter and Endotracheal Tube Sizes. Vol. 117, *Rhinology & Laryngology*. 2008.
74. Poletaeva MP. The possibilities for sex determination based on the specific anatomical features of the human thyroid cartilage. *Sudebno-Meditsinskaya Ekspertiza*. 2017;60(4):21–4.
75. Zolotenkova G V., Shigeev S V., Poletaeva MP, Gulgeldiev GG. The possibilities for gender determination based on the specific anatomical features of the human cricoid cartilage. *Sudebno-Meditsinskaya Ekspertiza*. 2021 Jan 1;64(1):24–8.

76. Cameriere R, Zolotenkova G V, Kuznetsov IA, Scendoni R, Pigolkin YI. Sex estimation based on the anthropometric measurements of thyroid cartilage using discriminant analysis. *Egypt J Forensic Sci* [Internet]. 2021;11(1):5. Available from: <https://doi.org/10.1186/s41935-021-00219-5>
77. Zieliński R. Morphometrical study on senile larynx. *Folia Morphol* [Internet]. 2001;60(2):73–8. Available from: www.fm.viamedica.pl
78. Shin HW, Ahn Y, Sung MW, Hyun Kim K, Kwon TK. Measurement of Cross-Sectional Dimensions of the Cricoid Cartilage: A Computed Tomographic Study. Vol. 118, *Rhinology & Laryngology*. 2009.
79. Fayoux P, Marciniak B, Devisme L, Storme L. Prenatal and early postnatal morphogenesis and growth of human laryngotracheal structures. *J Anat*. 2008 Aug;213(2):86–92.
80. Glikson E, Sagiv D, Eyal A, Wolf M, Primov-Fever A. The anatomical evolution of the thyroid cartilage from childhood to adulthood: A computed tomography evaluation. *Laryngoscope* [Internet]. 2017 Oct 1;127(10):E354–8. Available from: <https://doi.org/10.1002/lary.26644>
81. Sagiv D, Eyal A, Mansour J, Nakache G, Wolf M, Primov-Fever A. Novel Anatomic Characteristics of the Laryngeal Framework. *Otolaryngology–Head and Neck Surgery* [Internet]. 2016 Apr 1;154(4):674–8. Available from: <https://doi.org/10.1177/0194599815627781>
82. Ajmani ML. A metrical study of the laryngeal skeleton in adult Nigerians. *J Anat* [Internet]. 1990;171:187–91. Available from: <http://europepmc.org/abstract/MED/2081705>
83. Bakhshaee M, Khadivi E, Movahed R, Naserisadr M. Evaluation of the Distance Between Anterior Commissure of True Vocal Folds and the First Tracheal Ring and Related Laryngeal Indices in 40 Human Cadavers. *Journal of Voice* [Internet]. 2016 Mar 1;30(2):158–60. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2015.04.004>
84. Hamdan AL, Khalifee E, Ziade G, Semaan S. Sexual Dimorphism in Laryngeal Volumetric Measurements Using Magnetic Resonance Imaging. *Ear Nose Throat J* [Internet]. 2019 Apr 24;99(2):132–6. Available from: <https://doi.org/10.1177/0145561319840568>
85. Ara A, Zg A, Da M. Measurement of the Breadth of the Thyroid Lamina in A Bangladeshi Population by Dissection Method.
86. Shrestha D, Adhikari B, Dwa M, Ranjit N. Morphometry of adult cricoid cartilage in Nepalese cadavers: a cross-sectional observational study [Internet]. Vol. 7, *Journal of Karnali Academy of Health Sciences* www.jkahs.org.np JKAHS |. Available from: www.jkahs.org.np
87. López-Sánchez I, García-Lliverós A, Hernández-Sandemetrío R, Oishi N, Zapater E. Anatomical Study of the Larynx With Implications for Medialization Thyroplasty. *Journal of Voice*. 2025;
88. Alturkustani S, Ryan SM, O’Mahony SM, Toulouse A, O’Mahony C, Lone M. Comparison of ‘Complete Anatomy’ (CA) to conventional methods for teaching laryngeal anatomy to first-year dental and dental hygiene students in Ireland. *Translational Research in Anatomy*. 2024 Nov 1;37.
89. Henssen D, Karstens J, De Jong G, Duits JD, Boer L, Brink M, et al. Implementing 3D printing and extended reality in anatomy education: Organization, evolution, and assessment of an innovative teaching program in an undergraduate medical school in the Netherlands. *Annals of Anatomy*. 2025 Jan 1;257.

90. Villegas MC, Chamorro M V., Fandiño-Reyes A, Jiménez-Fandiño LH. 3D Printed Larynx as a Novel Simulation Tool for Window Elaboration in Medialization Laryngoplasty. *Journal of Voice*. 2023 Sep 1;37(5):798.e1-798.e5.
91. Huang CY, Chang TS, Alice Hwang L, Lin YS. Novel airway-cartilage combined model for medialization laryngoplasty and laryngotracheal reconstruction surgery planning. *Journal of the Chinese Medical Association*. 2022 Nov 1;85(11):1076–82.
92. Coşkun Yaş S, Altıntaş E, Keleş A, Demircan A. Comparison of bougie-guided cricothyrotomy and traditional cricothyrotomy techniques in an obese 3D-printed surgical airway manikin: a randomized controlled study. *BMC Anesthesiol*. 2024 Dec 1;24(1).
93. Smith ML, Jones JFX. Dual-extrusion 3D printing of anatomical models for education. *Anat Sci Educ*. 2018 Jan 1;11(1):65–72.
94. Tian H, Gao S, Yu J, Zhou X, Chen X, Zuo L, et al. Application of digital modeling and three-dimensional printing of titanium mesh for reconstruction of thyroid cartilage in partial laryngectomy. *Acta Otolaryngol*. 2022;142(3–4):363–8.
95. Kavanagh KR, Cote V, Tsui Y, Kudernatsch S, Peterson DR, Valdez TA. Pediatric laryngeal simulator using 3D printed models: A novel technique. *Laryngoscope*. 2017 Apr 1;127(4):E132–7.
96. Sajdak R, Trembath L, Thomas KS. The Importance of Standard Operating Procedures in Clinical Trials. *J Nucl Med Technol* [Internet]. 2013 Sep 1;41(3):231. Available from: <http://tech.snmjournals.org/content/41/3/231.abstract>
97. Cauas D. Definición de las variables, enfoque y tipo de investigación. Bogotá: biblioteca electrónica de la universidad Nacional de Colombia. 2015;2:1–11.
98. Gómez César Alfonso M, Clavijo Mayra Alejandra M, Guerrero Danuil S, Pisco Juan Carlos P, C Use PJ. of Chilean conservative fixative solution in veterinary anatomical parts [Internet]. Vol. 39, *Int. J. Morphol*. 2021. Available from: www.researchgate.net/publication/26447010_Conservacion_de_piezas
99. West BT, Welch KB, Galecki AT. Linear mixed models A practical guide using statistical software. Second Edition. Chapman and Hall/CRC; 2015.
100. Porzionato A, Macchi V, Mazzarolo C, Morra A, Sanudo J, De Caro R. Symmetrical Apophyses on the Posterior Margins of the Thyroid Cartilage: A Previously Undescribed Anatomical Variation with Potential Forensic Implications. *American Journal of Forensic Medicine and Pathology*. 2019 Mar 1;40(1):84–8.
101. Chang BA, Luu K, Newton EK, Morrison MD. Buckled Thyroid Cartilage: An Anatomic Variant. *Journal of Voice* [Internet]. 2018 Sep 1;32(5):621–4. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2017.07.020>
102. Urban MJ, Mattioni J, Jaworek A, Potigailo V, Sataloff RT. Hemilaryngeal Microsomia: An Anatomic Variant. *Journal of Voice*. 2017 Sep 1;31(5):601–4.
103. Raikos A, Paraskevas GK. The thyroid foramen: A systematic review and surgical considerations. Vol. 26, *Clinical Anatomy*. 2013. p. 700–8.
104. Song PL, Wang NY. A case of variant thyroid cartilage anatomy. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*. 2011 Jul;145(1):182–3.
105. Garbelotti Junior SA, Rocha PR, Liquidato BM, Marques SR, Arráez-Aybar LA, de Moraes LOC. Arch of cricoid cartilage anatomical variation: morphological and radiological aspects. *Surgical and Radiologic Anatomy* [Internet]. 2019;41(5):539–42. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00276-018-2174-2>
106. Johnson CM, Howell JT, Mettenburg DJ, Rueggeberg FA, Howell RJ, Postma GN, et al. Mechanical Modeling of the Human Cricoid Cartilage Using Computer-Aided Design:

- Applications in Airway Balloon Dilation Research. *Annals of Otolaryngology and Rhinology*. 2016 Jan 1;125(1):69–76.
107. Storck C, Gugatschka M, Friedrich G, Sorantin E, Ebner F, Fischer C, et al. Developing a 3D model of the laryngeal cartilages using HRCT data and MIMICS's segmentation software. *Logoped Phoniatr Vocol*. 2010;35(1):19–23.
 108. Johnson F, Veneziale L, Biggs M, Johnson C. Experimental modelling of internal surface laryngeal fracturing observed in fatal applied neck pressure. *J Forensic Leg Med*. 2025 Apr 1;111.
 109. Sharif KF, Perez AN, Sharbel DD, Griffith B, Pruthi S, Rohde SL, et al. Multimodal Virtual 3D Representation of a Giant Cell Tumor of the Thyroid Cartilage. *Ear Nose Throat J*. 2022 Jan 1;
 110. Perez AN, Sharif KF, Guelfi E, Li S, Miller A, Prasad K, et al. Ex vivo 3D scanning and specimen mapping in anatomic pathology. *J Pathol Inform*. 2023;14(September 2022):2–7.
 111. Saliba TV, Barros RSM de. Development and validation of a 3D laryngeal model in surgical skills training. *Braz J Otorhinolaryngol*. 2023 Jan 1;89(1):128–35.

12. ANEXOS

- 12.1. Anexo 1. POE de disección de cartílagos laríngeos**
- 12.2. Anexo 2. POE de escaneo de cartílagos laríngeos**
- 12.3. Anexo 3. POE de medición de cartílagos laríngeos**
- 12.4. Anexo 4. Fichas técnicas**
- 12.5. Anexo 5. Consideraciones éticas**
- 12.6. Anexo 6. Informes técnicos**
- 12.7. Anexo 7. Divulgación de conocimiento y convocatorias**
- 12.8. Anexo 8. Modelos tridimensionales**
- 12.9. Anexo 9. Cronograma y presupuesto**
- 12.10. Anexo 10. Metodología**
- 12.11. Anexo 11. Resultados de mediciones morfométricas**