

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Biomèdica

Títol: Segmentació automàtica d'imatges radiològiques per la posterior fabricació de guies quirúrgiques per la planificació de cirurgies de la zona cap-coll

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Camila Silva Delgado

Tutor: Maria Luisa Garcia-Romeu de Luna

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria dels processos de fabricació

Co-tutor: Anton Bardera Reig

Departament: Informàtica, Matemàtica Aplicada i Estadística

Àrea: Llenguatges i sistemes informàtics

Convocatòria (mes/any): Setembre 2023

ÍNDIX

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ.....	5
CAPÍTOL 2. CONCEPTES PREVIS.....	6
2.1. Conceptes previs clínics	6
2.2. Conceptes previs d'imatge mèdica	7
2.3. Conceptes previs de models CAD i impressió 3D	9
CAPÍTOL 3. ESTAT DE L'ART	10
CAPÍTOL 4. HIPÒTESIS I OBJECTIUS	12
4.1. Pregunta de recerca i hipòtesi	12
4.2. Objectius	12
CAPÍTOL 5. MATERIALS I MÈTODES.....	13
5.1. MATERIALS.....	13
5.1.1. Imatges.....	13
5.1.2. Comitè d'Ètica	14
5.1.3. Ground Truth.....	14
5.1.4. Programari i altres	15
5.2. MÈTODES.....	17
5.2.1. Anàlisi del cas i la imatge	17
5.2.2. Segmentació amb K-means	18
5.2.3. Proposta de metodologia de segmentació.....	19
5.2.4. Lectura de fitxers DICOM i creació d'un volum 3D en MATLAB	20
5.2.5. Segmentació automàtica	20
5.2.6. Segmentació semiautomàtica de la tiroides	22
5.2.7. Avaluació	24
5.2.8. Obtenció de models 3D a partir dels volums en MATLAB	24
5.2.9. Visualització i processament dels models	25
5.2.10. Impressió	25
5.2.11. Escaneig.....	27
5.2.12. Comparació 3D/ Avaluació.....	28
5.2.13. Validació	29
5.2.14. Guia per l'usuari.....	29

CAPÍTOL 6. RESULTATS	30
6.1. Evolució dels resultats de la segmentació	30
6.1.1. Segmentació automàtica	30
6.1.2. Segmentació semiautomàtica	31
6.1.3. Arxiu d'impressió abans de suavitzar els models	32
6.2. Resultats de la solució triada	32
6.2.1. Resultats de la segmentació amb MATLAB	32
6.2.2. Avaluació DICE segmentacions automàtica i semiautomàtica:	33
6.2.3. Models segmentacions pre i post suavitzat	33
6.2.4. Arxius d'impressió	35
6.2.5. Prototips impresos.....	36
6.2.6. Avaluació amb SolidWorks dels models i dels prototips escanejats	37
6.2.7. Resultats de la validació de la metodologia de segmentació	38
CAPÍTOL 7. DISCUSSIÓ	39
7.1. Discussió dels resultats obtinguts	39
7.2. Limitacions.....	41
7.3. Contribucions als objectius de desenvolupament sostenible (ODS) de les Nacions Unides41	
CAPÍTOL 8. CONCLUSIONS.....	42
REFERÈNCIES.....	43
ANNEX A. Planificació	45
ANNEX B. Codi.....	48
ANNEX C. Pressupost	49
ANNEX D. Comitè d'Ètica	50
ANNEX E. Informació sobre els casos clínics	51
ANNEX F. Guia per l'usuari.....	53
ANNEX G. Prova 'TotalSegmentator'	67

En primer lloc, vull expressar el meu agraïment a les persones que han format part del desenvolupament d'aquest projecte.

Als meus tutors, la Dra. Maria Luisa García-Romeu de Luna i el Dr. Anton Bardera Reig, la seva confiança, orientació experta i suport constant. Els seus coneixements i experiència en els dos camps de desenvolupament han estat molt enriquidors i claus. També vull agrair a la Dra. Inés Ferrer Real, que també ha format part del projecte. Al Dr. Jordi Gironès Vilà, per compartir el seu coneixement mèdic, les seves experiències i per resoldre els meus dubtes.

També vull expressar la meva gratitud a l'Àngel Brisa, enginyer industrial i becari del grup de recerca GREP, per la seva assistència en la impressió 3D. La seva orientació, el material proporcionat i els seus consells han estat essencials per al desenvolupament del treball. A més vull agrair al meu company Aaron Peñas, pels resultats del seu treball de fi de grau, que han estat fonamentals i necessaris per a aquest projecte.

Finalment, vull agrair a totes les persones que m'han acompanyat i donat suport al llarg del camí.

Moltes gràcies a tots.

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ

La regió del cap-coll del cos humà tot i ser relativament petita, concentra moltes estructures i presenta una gran complexitat anatòmica i funcional. Aquesta regió pot presentar patologies molt variades com tumors, lesions òssies i musculars, malalties autoimmunitàries, infeccions i trastorns vasculars i endocrins, entre d'altres. El càncer de cap i coll és el sisè més comú a escala mundial amb més de 630.000 nous casos i 350.000 morts anuals (1). Segons l'Enquesta Nacional de Salut del 2017, feta per l'Institut Nacional d'Estadística (INE), un 4,5% de la població enquestada a Espanya presentava problemes relacionats amb la tiroïdes (2).

Un dels passos més importants a l'hora d'abordar casos clínics en aquesta regió és la valoració de proves radiològiques. Aquestes proves assisteixen tant al diagnòstic, monitorització i determinació del tractament, com a la planificació de cirurgies si són necessàries (3).

La medicina està experimentant una gran transformació gràcies a la combinació amb l'enginyeria. La digitalització i altres avenços en l'obtenció i processament d'imatges mèdiques han revolucionat la manera d'abordar casos clínics. Un exemple és la creació de models 3D personalitzats, que pot millorar significativament la planificació quirúrgica oferint una millor comprensió de les estructures i com estan connectades (4).

Sota aquest context neix el projecte CUSTOMED, una iniciativa del Grup de Recerca en Enginyeria de Procés, Producte i Producció (GREP) de la Universitat de Girona. Aquest projecte enllaça metges i enginyers per millorar la fase de disseny digital per obtenir models 3D de la regió cap-coll, amb propòsits com l'optimització de la planificació de cirurgies, la formació d'estudiants i residents, i servir d'informació per als pacients. L'obtenció d'aquests models comença amb la detecció i segmentació de les estructures a partir d'imatges radiològiques. Com s'ha demostrat en estudis previs desenvolupats en el grup, aquesta segmentació és una tasca manual laboriosa i llarga (5, 6). La regió cap-coll, majorment formada per teixit tou, planteja un desafiament complex de segmentació i especialment d'automatització.

Aquest treball de fi de grau forma part d'aquest projecte, centrant-se en optimitzar la tasca de segmentació. L'objectiu principal és identificar les eines i mètodes més eficients per a desenvolupar una metodologia de segmentació automàtica de l'anatomia del coll amb un enfocament especial en la zona de la lesió, i per tant de més interès en la cirurgia. Amb l'objectiu final d'obtenir models CAD 3D i imprimir-ne prototips de guies quirúrgiques.

Es desenvolupa una proposta de protocol estàndard per a l'obtenció de guies quirúrgiques generalitzable a diversos casos clínics i que serveixi com a suport en la seva resolució. La principal motivació del treball és millorar la planificació i qualitat de les cirurgies mitjançant una eina que ofereixi una representació espacial i personalitzada de l'anatomia de la zona als metges, també amb l'objectiu de millorar l'experiència dels pacients.

CAPÍTOL 2. CONCEPTES PREVIS

En aquest capítol es descriuen els conceptes previs necessaris per a un bon seguiment, comprensió i contextualització del treball. Es divideix en conceptes clínics i conceptes tècnics (imatge mèdica, models CAD i impressió 3D).

2.1. Conceptes previs clínics

Anatomia de la regió cap-coll

El cap és la part superior del cos on es troba un dels òrgans més importants: el cervell, així com altres òrgans sensorials, i on s'hi desenvolupen nombroses funcions vitals. El pont entre el cap i la resta del cos és el coll, que presenta una anatomia complexa amb nombroses estructures de teixit tou. És responsable de la respiració, la parla, la regulació del metabolisme, el suport del cap i la connexió amb la resta del cos, així com de l'entrada i sortida circulatoria i limfàtica del cap. A la Taula 1 i a la Figura 1 podem veure enumerades i representades les estructures del coll i la seva disposició (7).

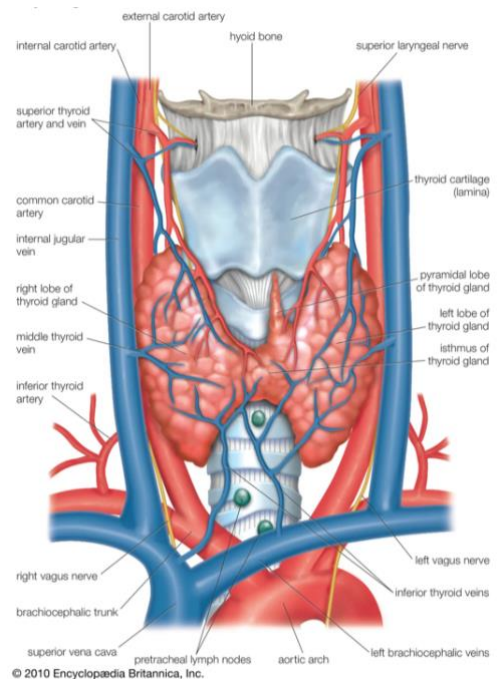


Figura 1. Estructures anatòmiques del coll (8)

Estructura òssia	Estructura vascular	Glàndules	Altres
Vèrtebres cervicals, os hioïdes, clavícules	A la dreta i l'esquerra: Artèria caròtida comuna, vena jugular interna	Tiroides, Paratiroides.	Laringe, tràquea, esòfag, cartílags, músculs del coll.

Taula 1. Enumeració de les estructures anatòmiques del coll

La regió del coll pot presentar una gran varietat d'alteracions i patologies: càncer de cap i coll, càncer de tiroides, tumors benignes, trastorns tiroïdals, trastorns vasculars, malalties autoimmunitàries, lesions òssies i musculars, disfàgia i infeccions, entre d'altres. Aquests trastorns es detecten a partir de proves de laboratori, exploracions i proves radiològiques. Un dels tractaments que poden requerir és una cirurgia.

Tenint en compte els casos treballats en el projecte, cal fer èmfasi en **la glàndula tiroides i la seva patologia**. La tiroides és una glàndula ubicada a la part frontal del coll formada per dues ales que envolten la tràquea. La seva funció principal és regular el metabolisme del cos produint hormones que regulen l'energia utilitzada per les cèl·lules. La tiroides pot no funcionar adequadament i presentar trastorns. El trastorn present en els casos treballats és el goll: un creixement de la tiroides en forma de tumoració. La causa principal és la deficiència de iode. Aquesta condició pot ser benigna o maligna i pot provocar: compressió d'estructures properes, dolor, obstrucció de les vies respiratòries i problemes de deglució (9).

2.2. Conceptes previs d'imatge mèdica

Les proves radiològiques són claus en el diagnòstic i tractament de malalties, utilitzen tècniques en 2D, 3D i 4D basades en principis físics diversos amb la finalitat d'explorar el cos. La tècnica 3D sobre la qual hem treballat i ens centrarem a descriure és la tomografia axial computada (TAC).

Tomografia axial computada (TAC): aquesta tècnica d'imatge mèdica permet obtenir imatges 3D de manera ràpida, el seu principi físic es basa en la radiació. S'obté col·locant el pacient estirat en una llitera al *gantry* de la màquina. Al voltant de la zona on es vol obtenir el TAC gira la font de rajos X projectant-los des de diferents angles sobre el pacient fins arribar a un detector. D'aquesta manera s'obtenen talls 2D de la imatge (llesques) que posteriorment es poden apilar i reconstruir una imatge 3D. Depenent del gruix de les llesques, n'hi ha més o menys al volum. A la Figura 2 podem veure un equip per a realitzar TACs i les seves parts i a la Figura 3, el funcionament (10).



Figura 2. Equip de tomografia computeritzada (11)

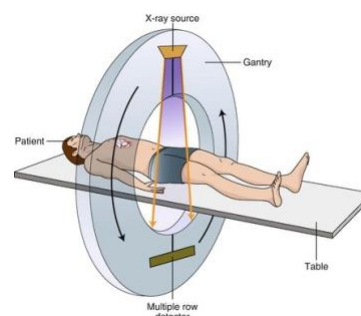


Figura 3. Funcionament d'un TAC (12)

El resultat és una imatge tridimensional formada per imatges bidimensionals, a la Figura 4 en podem veure exemples. Els valors dels píxels es troben en l'escala de radio densitat Hounsfield que va de -1000 fins infinit. Cada tipus de teixit presenta diferents valors d'aquesta unitat i per tant diferents nivells de gris, com es pot veure a la Figura 5. Es pot subministrar un contrast oral, normalment a base de iode, per millorar la visualització de les estructures en el TAC, fa que les estructures on es troba no deixin passar els rajos i siguin molt més visibles en la imatge (13).

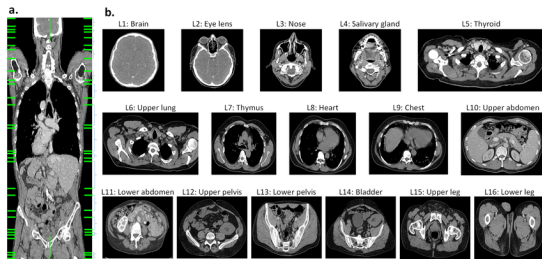


Figura 4. Llesques de TAC (14)

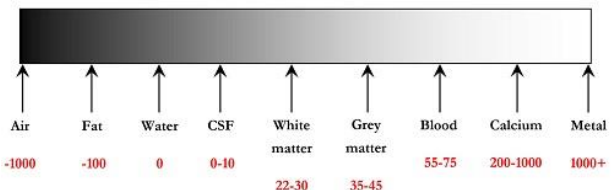


Figura 5. Escala Hounsfield i valors de gris (15)

Identificar les estructures anatòmiques en una imatge radiològica és tot un repte. En el cas del cap-coll, l'eina 'CT head neck - sectional-anatomy' presenta un TAC de la zona cap-coll amb les estructures i el seu nom senyalades per identificar-les, fent més fàcil la comprensió del TAC (16).

Format DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine): és un format que emmagatzema imatges i la informació necessària per interpretar-les (DICOM Metadata), dimensions, nombre d'estudi i sèrie, dades del pacient, de l'adquisició... Els visualitzadors DICOM organitzen aquesta informació i les imatges en volums on recórrer les diferents llesques als tres plans: coronal, sagital i transversal. Aquest últim és on millor s'identifiquen les estructures.

Segmentació d'imatge mèdica: la segmentació consisteix en identificar i obtenir per separat regions específiques en una imatge, com ara estructures anatòmiques, teixits o tumors. Hi ha moltes maneres, manuals i automàtiques, de segmentar. Hi ha diverses característiques que es poden tenir en compte per a desenvolupar una segmentació automàtica: intensitat, forma, textures, mida... Per l'interès del treball, ens centrarem a descriure dos algorismes de segmentació automàtics basats en intel·ligència artificial:

- **Algorisme K-means:** és un algorisme de classificació no supervisada, és a dir, sense necessitar etiquetes pre-definides, que agrupa els píxels amb característiques similars en k regions, minimitzant la distància euclidiana entre cada punt i el punt mig més proper (17).

- **Algorisme Active Contours (Contorns Actius):** també anomenat *Snakes*, és un algorisme iteratiu que segmenta la imatge per regions. Primer s'especifica el contorn que delimita una regió concreta i després el contorn s'ajusta per adaptar-se als límits de la regió al llarg de la imatge (17).

El *Ground Truth* (GT) és el terme que es fa servir per referir-se a la solució, en aquest context, d'una segmentació. Si s'ha realitzat una segmentació i es disposa del GT corresponent, se'n pot avaluar la qualitat i similitud entre els dos. Una mesura d'avaluació és el **coeficient DICE**, (Eq 1 (18)), mesura la coincidència entre la segmentació i el GT comparant els píxels coincidents respecte la suma total de píxels. És un valor entre 0 i 1, on 0 indica no coincidència i 1, coincidència total (18).

$$Dice = \frac{2 \times \text{Area of overlap}}{\text{Total area}} = \frac{2 \times \text{Prediction} \cap \text{Ground truth}}{\text{Prediction} \cup \text{Ground truth}} \quad (\text{Eq 1 (18)})$$

2.3. Conceptes previs de models CAD i impressió 3D

Models CAD (Computer-aided design): el disseny assistit per ordinador consisteix en fer servir software especialitzat des d'un ordinador per dissenyar, modificar i analitzar representacions gràfiques digitals en 2D i 3D. Un dels formats més emprats per desar aquests models és el **format STL (Standard Triangle Language)**, que permet desar objectes 3D representant la geometria de la superfície de l'objecte com un conjunt de triangles.

Impressió amb fabricació additiva: més popularment coneguda com a impressió 3D, és el procés per crear objectes capa a capa a partir d'un model 3D. El model digital es talla en capes fines mitjançant programari específic i s'exporta en format G-code per ser llegit per la impressora. Les capes s'imprimeixen consecutivament una sobre l'altre fins obtenir la peça impresa. Els tipus d'impressió 3D més utilitzats són SLA (Estereolitografia), SLS (Sinterització Selectiva amb Làser) i sobretot FFF (Fabricació per Fusió de Filament), que es pot veure a la Figura 6. La impressió 3D té múltiples aplicacions com prototipatge ràpid i producció final de productes i peces (19).

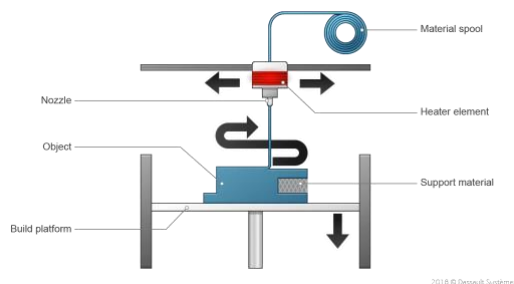


Figura 6. Tècnica d'impressió FFF (19)

CAPÍTOL 3. ESTAT DE L'ART

En aquest capítol es descriu la recerca realitzada de l'estat de l'art en tècniques de segmentació automàtica de la regió del cap-coll, que ha estat el focus principal del treball. La regió del coll té una gran complexitat de segmentació i és un tòpic d'investigació molt ambiciós. Es descriu també l'estat de l'art en planificació de cirurgies a partir de models 3D i guies quirúrgiques.

L'any 2020 es va posar en marxa l'HECKTOR challenge, un repte per desenvolupar mètodes per segmentar tumors en TACs de pacients amb càncer d'orofaringe. Es van analitzar les solucions presentades, que anaven des de mètodes tradicionals com aplicació de llinars, *Region Growing* i *Active Contours*, fins a enfocaments més complexos basats en *Deep Learning*. La majoria dels participants van presentar propostes basades en *Deep Learning*, especialment arquitectures basades en U-Net, aquestes propostes van obtenir millors resultats. Aquest anàlisi és una bona manera d'avaluar l'estat de l'art en metodologies de segmentació (20).

Amb relació a la segmentació de les estructures anatòmiques del cap-coll, en l'article *Clinically Applicable Segmentation of Head and Neck Anatomy for Radiotherapy: Deep Learning Algorithm Development and Validation Study* (21) es va desenvolupar una metodologia basada en una arquitectura de *Deep Learning* 3D U-Net que va poder segmentar 19 dels 21 òrgans en risc estudiats amb una precisió similar a la segmentació realitzada per experts. L'estudi va demostrar que el model era capaç de generalitzar-se a pacients de diferents geografies, dades demogràfiques i protocols d'escaneig.

Una de les eines més avançades i prometedores és 'TotalSegmentator'. Es descriu com "capaç de segmentar automàticament tot el cos en un TAC en 2 minuts". Realment, pot segmentar 104 estructures, que es poden veure a la Figura 7. La seva tecnologia es basa en un model preentrenat 3D U-Net. (22-24)

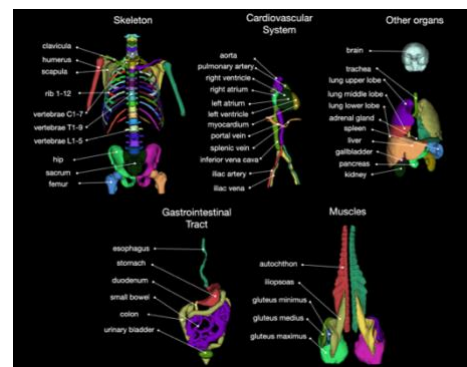


Figura 7. Estructures segmentades per 'TotalSegmentator' (22)

Donat que aquesta eina es troba com a extensió en 3D Slicer, es va fer una prova en un TAC del cap-coll d'un dels casos treballats. Es va obtenir una bona segmentació de les estructures òssies i de la part superior del tòrax, però, tot i ser una eina molt avançada, no pot realitzar una bona segmentació de l'anatomia del teixit tou del coll (ANNEX G). Això confirma encara més la dificultat i manca de coneixement en la segmentació de la zona.

Com també s'ha descrit en els articles comentats, els models de segmentació basats en *Deep Learning* requereixen grans volums de dades i el seu respectiu GT per ser entrenats. Fent recerca en bases de dades públiques es poden obtenir TACs de la zona cap-coll de diferents estudis. No obstant això, s'ha detectat una manca de disponibilitat d'obtenir-los amb les estructures segmentades, fent difícil desenvolupar aquest tipus de models. Amb relació a altres metodologies que no requereixin grans volums de dades, no s'ha trobat un gran nombre d'estudis recents aplicats en aquesta regió.

Tradicionalment les cirurgies s'han planificat a partir del coneixement en anatomia i proves radiològiques. Amb el pas dels anys, els avenços en imatge mèdica i la seva visualització han permès veure'n reconstruccions 3D de l'anatomia del pacient. Un pas més són els models 3D, a partir de les estructures anatòmiques segmentades es poden obtenir models digitals 3D personalitzats del pacient i fer-ne una impressió per tenir-los físicament.

L'hospital Sant Joan de Déu a Barcelona compta amb una unitat pionera a Espanya en l'ús de tecnologies 3D per a la planificació i simulació de cirurgies complexes. La primera cirurgia planificada amb un model 3D imprès va ser el 2013, des de llavors la unitat ha crescut; s'ha definit un circuit assistencial per a tots els serveis i unitats amb l'objectiu d'oferir processos de planificació quirúrgica àgils i optimitzats. Una de les direccions futures de recerca suggerides és utilitzar materials tous com hidrogels i silicones per ampliar el ventall d'aplicacions i millorar la imitació del cos humà. Fan servir una tècnica d'impressió 3D multimaterial i híbrida FFF-DIW. A la Figura 8 podem veure un exemple de prototip imprès, un neuroblastoma imprès amb tres materials diferents, un pel suport, un per les estructures anatòmiques i l'altre pel tumor (25,26).



Figura 8. Diferents vistes del prototip de neuroblastoma imprès en 3D (26)

Segons Nyirjesy SC *et al.* a la revisió sobre el paper del disseny assistit per ordinador/fabricació assistida per ordinador i la impressió tridimensional en la cirurgia oncològica del cap i el coll (27), les aplicacions més avançades de la impressió 3D en cirurgia oncològica de cap i coll inclouen la planificació virtual de la cirurgia completa, guies d'osteotomia impreses en 3D i les plaques reconstructores específiques del pacient. A més, com a projecció futura s'estan desenvolupant nous materials i s'està explorant la bioimpressió per poder produir construccions de teixits per utilitzar-les en aplicacions quirúrgiques.

CAPÍTOL 4. HIPÒTESIS I OBJECTIUS

4.1. Pregunta de recerca i hipòtesi

A partir de tècniques de processament d'imatge, és possible segmentar automàticament imatges radiològiques de la zona cap-coll per obtenir models 3D i posteriorment fabricar additivament guies quirúrgiques?

“Potser desenvolupant algorismes de tractament d'imatge i IA i analitzant les eines existents de segmentació automàtica podríem obtenir segmentacions de l'anatomia de la zona cap-coll i obtenir-ne guies quirúrgiques en 3D per millorar el procediment actual de planificació d'una cirurgia. “

4.2. Objectius

El projecte descrit és un projecte ambiciós i multidisciplinari amb diversos objectius. Alguns fan referència a la recerca i a l'aprenentatge de coneixements i d'altres al propi procés per l'obtenció de les guies quirúrgiques.

- Estudiar l'anatomia de la zona-cap coll i conèixer les lesions i la patologia.
- Fer recerca sobre les tècniques actuals de segmentació automàtica per aquesta zona.
- Treballar amb casos de pacients reals. Analitzar i entendre les proves, el tipus d'imatge i comunicar-se amb el metge dels casos per desenvolupar i validar el projecte.
- A partir d'algorismes de processament d'imatge segmentar automàticament i/o semiautomàticament els diferents teixits de la zona d'interès i diferents estructures anatòmiques en més o menys detall tenint en compte la dificultat de segmentació de teixits tous.
- Analitzar eines de segmentació automàtica existents.
- Crear un model CAD 3D personalitzat a partir de la segmentació, processar-lo i imprimir-lo fent aprenentatge en conceptes de fabricació additiva.
- Prototipatge amb fabricació additiva de models quirúrgics obtinguts en les etapes anteriors que serveixin d'eina per facilitar l'activitat de planificació dels metges.
- Comparar el resultat final amb guies quirúrgiques obtingudes a partir de tècniques de segmentació manual d'un altre treball de fi de grau desenvolupat en paral·lel (5).
- Dissenyar un protocol que estandarditzi l'obtenció d'aquestes guies quirúrgiques i com es complementaríen amb la feina del metge.

CAPÍTOL 5. MATERIALS I MÈTODES

A continuació es descriuen els materials i mètodes emprats per donar resposta a la pregunta de recerca i aconseguir els objectius plantejats.

5.1. MATERIALS

Un cop realitzada la recerca inicial, plantejat el projecte i els seus objectius es va valorar què es necessitava per obtenir els models: des de les imatges, visualitzadors DICOM, software de processament d'imatge, programari per visualitzar i tractar models 3D, programari, impressora, materials per la impressió amb fabricació additiva i escàner i software d'escanejat.

5.1.1. Imatges

Les guies quirúrgiques es fan a partir d'imatges radiològiques. El desenvolupament d'aquest projecte es troba en el context de casos clínics reals, per tant les imatges que es van fer servir són les pròpies demanades pel metge que portava el cas. Analitzar i tractar una imatge coneixent el seu context, la informació clínica i les anotacions d'un radiòleg (ANNEX E) i podent comptar amb el coneixement del metge aporta molt de valor a l'hora d'entendre-les i prendre decisions en la segmentació. Aquest metge ha estat el Dr. Gironès Vilà, cirurgià de l'Hospital Trueta, part de l'institut d'Investigació Biomèdica de Girona (IDIBGI) i docent a la UdG.

Com a punt de partida el metge va proporcionar 5 casos reals de pacients, tots relacionats amb la tiroides. Amb el 3D Slicer es van poder revisar les carpetes proporcionades i es va valorar la informació. Cadascun dels casos comptava amb varies proves, entre d'altres, tots tenien un TAC de la zona cap-coll. Aquesta ha estat la prova sobre la qual hem treballat la segmentació. El TAC juntament amb la RM són els dos tipus d'imatge 3D més utilitzats. El TAC és una bona opció per a la segmentació automàtica per la seva bona resolució espacial, alt contrast de l'estructura òssia, menor afectació per artefactes de moviment i per la rapidesa d'adquisició de la imatge (10, 11).

Diferents TACs d'una mateixa zona poden presentar diferències degudes a la posició i a l'equip emprat. Per elaborar un algorisme de segmentació automàtica que pogués funcionar amb imatges diferents, aquestes havien de ser el més semblant possible entre elles. Es va determinar que les imatges dels pacients numerats com a 1 i 2 van ser adquirides amb el mateix equip i per tant, presentaven semblances. Tots dos presenten una sèrie amb una prova anomenada 'VOLUM

T.TOUS COLL 2.0', un TAC realitzat amb contrast intravenós en el qual s'ha basat la segmentació. Es va treballar amb aquests dos casos, desenvolupant la metodologia a partir del cas 1 i fent servir el cas 2 per validar i testejar la metodologia escollida.

5.1.2. Comitè d'Ètica

En aquest projecte es realitza un estudi d'investigació que implica una experimentació amb dades de persones relacionades amb la salut, en el nostre cas imatges radiològiques. Veure ANNEX D.

Qualitat de les dades: aquestes imatges han estat obtingudes a petició del metge especialista del cas en un TAC d'última generació a l'Institut de Diagnòstic per la imatge de l'Hospital Santa Caterina de Salt. Han estat obtingudes per un grup de tècnics especialitzats en obtenció d'imatge mèdica i anotada i informada per un radiòleg. És per això que se'n garanteix la seva qualitat.

Privacitat i protecció de dades: donat que són dades mèdiques s'ha de respectar la protecció de dades, per això les imatges estaven anonimitzades i els pacients van firmar un consentiment per utilitzar les seves imatges en aquest projecte, van ser informats del projecte, la seva finalitat i del tractament que rebrien les seves imatges. Es pot trobar més informació a l'ANNEX D.

5.1.3. Ground Truth

Per a l'avaluació de la segmentació realitzada i comparació també en 3D es va fer servir la segmentació dels casos 1 i 2 obtingudes manualment fent servir 3D Slicer. La segmentació l'ha obtingut per Cruz Peñas A. en el marc del seu treball de fi de grau *Análisis de diferentes métodos para segmentar estructuras anatómicas de tejido blando y su posterior impresión mediante fabricación aditiva*. (5). Proporciona tant la segmentació en format .SEG (Segmentation) per obrir en 3D Slicer com en format .NRRD (Nearly Raw Raster Data) per poder treballar-hi com un volum en MATLAB. El Ground Truth (GT) del cas 1 compta amb les següents estructures anatòmiques segmentades: Estructura òssia, Vena jugular dreta, Caròtida, Tràquea, Vena jugular esquerra, Glàndula tiroides, Cartílag tiroide, Os hioides. Podem veure la visualització del GT a la Figura 9.

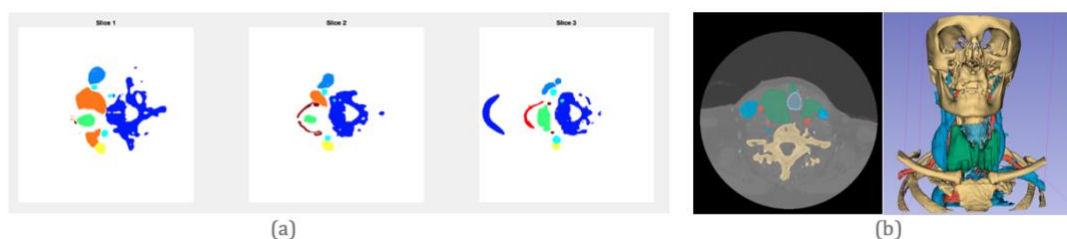


Figura 9. Visualització del GT. (a) amb MATLAB etiquetat amb colors. (b) amb 3D Slicer, sobre el TAC i en 3D

5.1.4. Programari i altres

3D Slicer (28): per visualitzar imatges radiològiques és necessari un visualitzador DICOM. Actualment hi ha molts visualitzadors lliures que, a banda de permetre visualitzar les imatges com un conjunt, tenen funcionalitats com: modificar els nivells de contrast i intensitat per visualitzar millor la imatge, aplicar filtres, segmentar manual i automàticament, afegir anotacions, processament i visualització de models 3D i fer transformacions, entre d'altres. Es van comparar diversos visualitzadors DICOM. Un dels requeriments que havia de tenir era poder fer-lo servir amb el sistema operatiu macOS i ser d'ús lliure. L'escollit va ser el 3D Slicer, versió 4.8.

Com a avantatge principal, el 3D Slicer permet carregar una carpeta sencera i presentar la informació detectada de manera ordenada per veure el nom, l'ID, la descripció, la mida, la data... Genera una DICOM *database* on es recullen tots els casos i s'hi pot accedir a les diferents sèries. També carrega automàticament les llesques de les sèries de proves 3D en volums escalars. Compta amb funcionalitats per segmentació manual i automàtica de les imatges i permet l'edició i processament de les segmentacions. Un altre aspecte molt important és que permet obrir, visualitzar, editar i desar models en diferents formats i fer-ne la conversió, sobretot és d'interès que permeti treballar amb models STL. A la Figura 10 podem veure el 3D Slicer amb un TAC en visualització en diferent plans, un volum i les diferents opcions de l'entorn desplegadas.

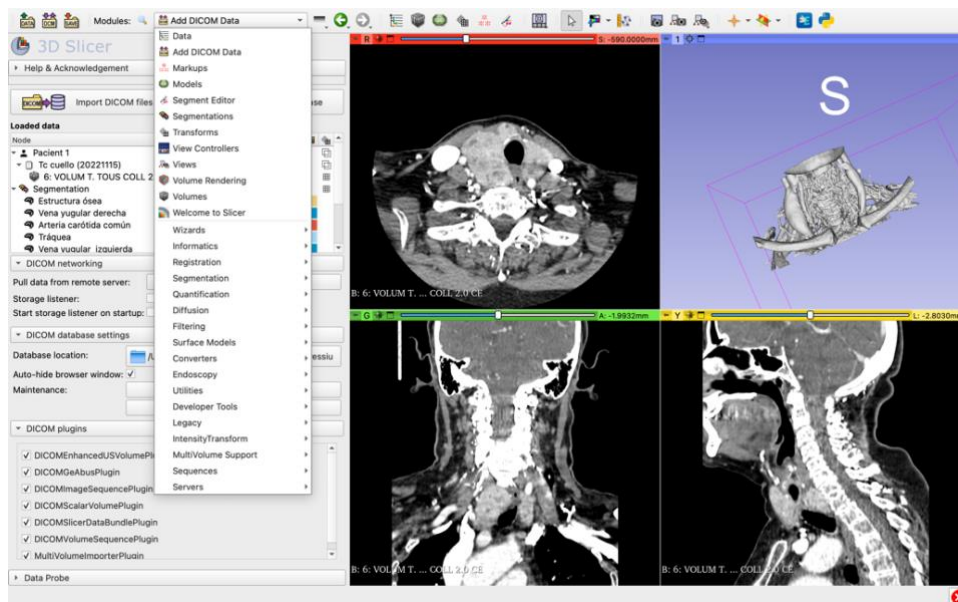


Figura 10. 3D Slicer

Així doncs les seves característiques van permetre fer-lo servir per múltiples etapes del projecte com es descriurà més endavant en la metodologia emprada.

MATLAB (29): l'entorn i llenguatge de programació MATLAB (versió R2022b) ha estat l'eina principal per obtenir la segmentació. Compta amb l'*Image Processing Toolbox* i el *Medical Imaging Toolbox*, dues extensions del propi MATLAB que compten amb funcions, algorismes i altres aplicacions per processar, visualitzar i analitzar imatges en 2D i 3D.

BCN3D Stratos (30): és un software d'*slicing* (llescat) per a impressió 3D que permet importar models STL i preparar l'arxiu triant valors pels diferents paràmetres d'impressió (versió 1.6.4).

Impressora 3D i material: la impressora que es va fer servir va ser la impressora professional del model Sigma R19 (31), del fabricant BCN3D Technologies. Una impressora que utilitza la metodologia FFF (Fabricació per Fusió de Filament). Té dos capçals independents que permeten imprimir amb dos materials, en el nostre cas PLA de color blau pel prototip i PVA pels suports.

Els dos materials són plàstics biodegradables i biocompatibles especialment utilitzats en impressió 3D i en indústries mèdiques. L'àcid polilàctic (PLA) és un termoplàstic d'origen natural, un dels plàstics que més s'utilitza en fabricació additiva perquè és fàcil d'extrudir. L'alcohol polivinílic (PVA) és un polímer sintètic soluble en aigua, flexible i amb capacitat d'adherir-se a superfícies. Es fa servir com a suport en impressió 3D per permetre la creació de formes complicades. Com que és soluble en aigua, un cop acabada la impressió es retira fàcilment.

Escàner i software per l'escaneig: l'escàner emprat per fer l'avaluació de les impressions va ser l'Einscan Pro 2x Plus de Shining 3D (V3.3.0.2) (32). Aquest escàner captura objectes i els converteix en models digitals en 3D d'alta precisió ràpidament. Escaneja els objectes amb una càmera sobre una base giratòria. El software que es fa servir per aquest escàner és el Shining 3D, del mateix fabricant, permet processar i editar les dades escanejades per processar els models.

Des del propi Shining 3D hi ha l'opció d'obrir el cos escanejat en 3D directament amb el software CAD/CAM Geomagic Essentials (33). Un programari dissenyat i desenvolupat per a l'anàlisi i configuració de la malla que fa de pont entre l'escaneig i el model CAD i ofereix les eines necessàries per processar-lo i millorar-lo.

SolidWorks (34): (versió 2021) és un programa de disseny CAD desenvolupat per Dassault Systèmes. Permet modelar, visualitzar i editar models en 2D i 3D. També permet fer assemblatges i comparacions entre dos cossos que és on hi havia l'interès pel nostre projecte.

5.2. MÈTODES

Un cop feta la recerca, valorat l'estat de l'art i tenint coneixement sobre dades i programari que faríem servir, la segona part del desenvolupament del projecte era dissenyar la segmentació de les imatges. La metodologia emprada pel desenvolupament es podria dividir en dues etapes, la primera, i on s'hi ha fet més èmfasi, va ser obtenir un mètode de segmentació automàtic o semiautomàtic de l'anatomia de la imatge i fer la seva respectiva avaluació. La segona va ser processar els models obtinguts amb la segmentació, preparar-los per ser impresos, imprimir-los en 3D i avaluar-ne el resultat. El cas de partida per l'elaboració d'aquest mètode ha estat el cas del pacient 1, també anomenat **Cas del goll compressiu**.

PRIMERA PART: OBTENCIÓ DE LA SEGMENTACIÓ

5.2.1. Anàlisi del cas i la imatge

Es va treballar sobre un TAC de la zona cap-coll realitzat amb contrast. A la Taula 2 i Figura 11 se'n recullen les característiques més rellevants obtingudes en un anàlisi de la imatge i de la DICOM metadata dut a terme amb 3D Slicer i MATLAB. També podem veure la visualització de la imatge amb el 3D Slicer en els 3 talls i altra informació rellevant com l'Image Spacing i Origin i l'*scan order* que en aquest cas és Axial IS, transversal al cos.

Mida	512x512x253
Valor màxim (HU)	31455
Valor mínim (HU)	-2048

Taula 2. Dades de la imatge

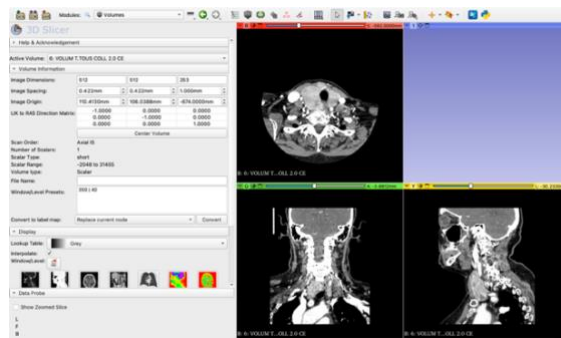


Figura 11. Visualització de la imatge amb 3D Slicer

A la Figura 12 podem veure l'histograma d'intensitats de la imatge i com hi ha un pic en el valor mínim, el -2048 que és el fons. La resta de valors es concentren majoritàriament entre el -1000 i el 2500, la resta de valors no són tan freqüents.

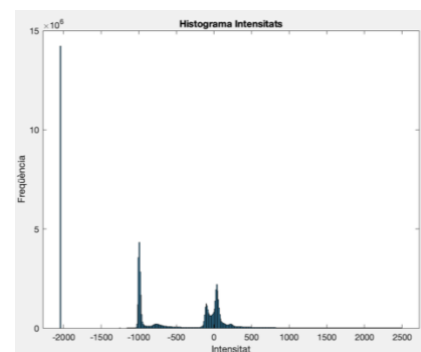


Figura 12. Histograma d'intensitats de la imatge

El 3D Slicer té una eina que permet establir l·lindars i visualitzar només els píxels de valor comprès al l·lindar. Amb aquesta eina també es van poder fer proves i fer-nos una idea dels valors d'intensitat de les diferents estructures anatòmiques. A la Figura 13 podem veure com a la imatge només es mostren els píxels amb valors entre els l·lindars escollits a la barra de l'esquerra.



Figura 13. Eina de l·lindars d'intensitat

Un altre anàlisi interessant va ser avaluar els rangs d'intensitat de les estructures anatòmiques segmentades al Ground Truth (GT), per valorar la possibilitat d'obtenir un mètode automàtic que les segmentés basant-se en les intensitats. Aquesta avaluació es va dur a terme utilitzant la funció de MATLAB (*Image processing Toolbox*) `regionprops3`(GT, Image, 'VoxelValues'), que proporciona els valors d'intensitat per a cada regió. Els resultats d'aquesta avaluació es mostren a la Taula 3, es detallen els valors d'intensitat i les dimensions en vòxels de cada una de les regions. El que més destaca d'aquesta taula és el solapament entre els valors d'intensitat de les diferents estructures.

Num Regió	Estructura anatòmica	Nombre Voxels	Intensitat (Hounsfield Units)			
			Max	Min	Mediana	Mitjana
0	Fons	60388073	31455	-2048	-744.38	-793.00
1	Estructura òssia	3692707	4842	-2048	35.00	1.12
2	Vena jugular dreta	347302	1268	-1049	14.00	-39.35
3	Caròtida	667836	3757	-2048	45.00	-39.62
4	Tràquea	255622	3395	-1082	40.00	-6.67
5	Vena jugular esquerra	190844	415	-971	186.00	107.84
6	Glàndula tiroides	505238	2485	-1085	113.00	85.52
7	Cartílag tiroide	9799	3231	-190	28.00	147.28
8	Os hioides	27481	3288	-355	182.86	69

Taula 3. Anàlisi dels valors d'intensitat per regió

També podem veure, tant a la Taula 3 com amb la eina de l·lindars del 3D Slicer, com els valors d'intensitat de les estructures vasculars són molt alts i es troben solapats amb l'estructura òssia, això és degut al contrast administrat a la prova.

5.2.2. Segmentació amb K-means

Després d'aquest primer anàlisi es va fer una primera aproximació de segmentació automàtica fent servir l'algorisme d'aprenentatge no supervisat K-means. Com que aquest algorisme troba grups i regions similars en una imatge, pot proporcionar informació sobre les possibles similituds entre estructures. Per això el resultat d'aquesta prova podia ser útil per dissenyar la metodologia.

Es va utilitzar la funció `imsegkmeans3()` que inclou MATLAB i aplica K-means a volums. Prèviament, es va millorar la imatge aplicant una millora de contrast adaptativa (`adapthisteq()`) i un filtre per a imatge mèdica (`medfilt2()`). A continuació es va provar l'algorisme amb diferents valors de k (nombre de regions), avaluant qualitativament els resultats obtinguts. Els resultats van permetre identificar amb èxit el fons i l'estructura òssia juntament amb les estructures vasculares. No obstant això, com es pot veure a la Figura 14, en augmentar el valor de k no es van distingir altres estructures als teixits tous, sinó que es van trobar subregions a les estructures òssies i vasculares que, en la majoria de zones, no corresponien a cap característica anatòmica específica. Tot i que amb una k=12 la tiroides i altres estructures vasculares semblaven diferenciar-se era de manera poc precisa, confirmant la dificultat de la segmentació.

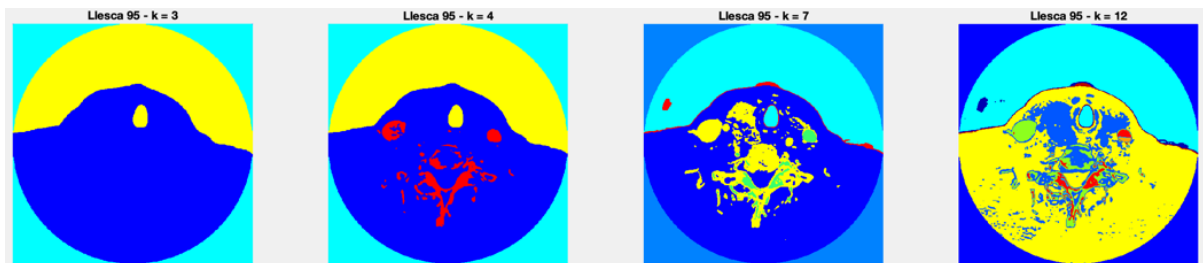
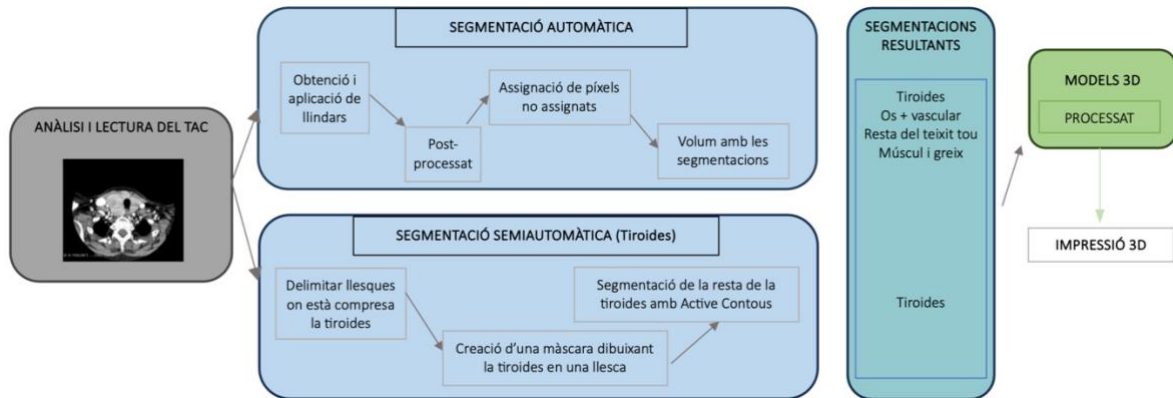


Figura 14. Segmentació de diferents llesques fent servir K-means

5.2.3. Proposta de metodologia de segmentació

Després de considerar el context, les dades, l'objectiu del projecte, l'anàlisi i la primera prova de segmentació, es va dissenyar la metodologia. Es va tenir en compte que no comptàvem amb un gran volum de dades i el seu respectiu GT com per aplicar algun mètode de *Deep Learning* complex. Les metodologies de segmentació no basades en *Deep Learning* més comuns són: aplicació de llindars, *Region Growing*, definició de centroides, Multi-atlas i *Active Contours*, entre d'altres (35-38). Degut al solapament dels valors d'intensitat entre les diferents estructures del teixit tou i els resultats de la segmentació amb K-means, vam haver de seleccionar objectius de segmentació que fossin viables per ser automatitzats.

La decisió final va ser dissenyar una metodologia, formada per un mètode automàtic i un semiautomàtic, basada en llindars, *Active Contours* i altres processaments, per obtenir una segmentació precisa de la glàndula tiroides, ja que és l'estructura anatòmica d'interès en aquest cas clínic i pot ser útil tenir-ne una guia quirúrgica. A més, també es van voler segmentar i obtenir volums 3D diferenciant teixits: el múscul i el greix, l'os i les estructures vasculares i la resta del teixit tou. Com es va veure en l'anàlisi, la separació de l'estructura òssia i l'estructura vascular era una tasca complicada a partir de les intensitats, a causa del contrast. Per tant, es va decidir segmentar-les com un conjunt. A l'Esquema 1 podem veure esquematitzada aquesta solució.



Esquema 1. Esquema de la metodologia de segmentació

5.2.4. Lectura de fitxers DICOM i creació d'un volum 3D en MATLAB

El primer pas consistia en obrir el TAC en l'entorn MATLAB. Inicialment, es va plantejar la possibilitat de desar el TAC en format .NRRD per després obrir-lo com a volum. Aquest enfocament va portar diversos problemes relacionats amb el format, les dimensions i la pèrdua significativa d'informació. Per tant, es va decidir llegir-lo i treballar en format DICOM. Per fer-ho es van llegir els arxius del directori i es va desar en informació rellevant sobre l'espaiat i dimensions de imatges en variables. Posteriorment, els fitxer .dcm es van desar com a un sol volum en una matriu 3D. És important llegir les imatges en format int16 donat que els TACs presenten valors negatius d'intensitat.

5.2.5. Segmentació automàtica

Un cop definida la metodologia que es duria a terme es va desenvolupar amb MATLAB el codi que segmentés automàticament la imatge. Com s'ha descrit a la metodologia, es volia aconseguir segmentar a partir d'intensitats: la tiroides, estructura òssia + vascular, resta del teixit tou (sense la tiroides), múscul i greix i per últim, separar també el fons. Es va voler que cada píxel tingués només una etiqueta i que per tant les diferents segmentacions entre sí encaixessin.

Obtenció de valors de llindars per a la segmentació: durant l'anàlisi de la imatge es va observar que els diferents teixits presentaven un rang de valors d'intensitat més o menys distintius, el que ens va oferir un bon punt de partida per a la segmentació. Utilitzant l'eina del 3D Slicer, que permet visualitzar només els píxels amb intensitats entre dos llindars especificats, es van provar diversos llindars i es van visualitzar les imatges resultants. A la Figura 15 (a) es mostra un exemple de com es van trobar els llindars que es van definir per la glàndula tiroides i els píxels que van quedar seleccionats. Podem veure però, com queden píxels que no hi pertanyen. A Figura 15 (b) podem veure l'exemple del múscul i greix. Per trobar aquests llindars es van adaptar els

valors de *Window i Level* (amplada de l'interval d'intensitat visible i valor mitjà de l'interval) per millorar la visualització del teixit i triar el llindar de manera més precisa. Així es va fer per tots els teixits. Es recullen els rangs d'intensitat escollits per cada teixit a la Taula 4. També es pot observar solapament entre alguns dels valors d'intensitat.

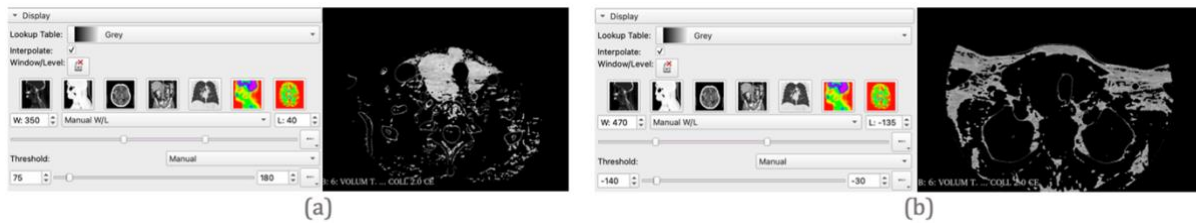


Figura 15. Exemple de tria de llindars. (a) per la tiroides. (b) pel múscul i greix

Estructura	Min.	Màx.
Estructura òssia + vascular	230	31455
Teixit Tou	-18	162
Tiroides	75	180
Múscul i greix	-140	-30
Fons	-2048	-450

Taula 4. Llindars escollits

Nous volums amb els valors d'intensitat compresos entre els llindars: un cop es van tenir aquests llindars es van crear volums binaris que contenien els píxels que estan dins dels intervals d'intensitat per a cada teixit. Així es va obtenir una primera segmentació dels teixits i la tiroides.

Post-processament de la segmentació de la tiroides: com hem comentat, l'interès principal era obtenir una segmentació precisa de la tiroides. Això va requerir un procés de post-processament ja que la segmentació inicial contenia molts píxels que no pertanyien a la tiroides i altres parts quedaven buides. Per solventar això es va triar una llesca específica (llesca 79) amb una vista clara de la tiroides. A partir d'aquesta llesca es va iterar i visualitzar el processament, ajustant-lo mitjançant proves i errors per aconseguir la millor segmentació possible.

El primer pas va ser aplicar una operació d'erosió morfològica *imerode* a la segmentació inicial de la tiroides. Aquesta operació va servir per separar píxels innecessaris adherits a la tiroides. Per això, es van ajustar els paràmetres d'erosió per obtenir el millor resultat. Posteriorment es va aplicar la funció *bwmorph3* amb l'opció 'fill' per omplir els forats interns. Després es va aplicar una altra funció d'ompliment llesca a llesca, assegurant-nos d'eliminar qualsevol forat dins de la segmentació, ja que hi havia forats que s'estenien des de la primera fins a l'última llesca i no s'havien omplert amb el primer ompliment.

Seguidament, les regions contigües es van etiquetar fent servir la funció *bwlabeln*, assignant etiquetes úniques a cada regió. La regió més gran, que representava la tiroides, va ser desada en una màscara binària buida amb les mateixes dimensions que el volum original. D'aquesta manera es van eliminar els píxels sobrants. Per fer-ho es van comparar els valors d'etiquetatge de cada llesca i es va assignar 1 a la màscara si coincidien (representant la tiroides) i 0 si no ho feien.

Finalment, per millorar la connexió de les regions de la tiroides, es va aplicar una dilatació morfològica i un ompliment de forats al volum llesca a llesca. Per aquest pas també es van anar ajustant els paràmetres per obtenir els millors resultats.

Creació d'un volum únic amb totes les segmentacions: després d'obtenir les segmentacions de les regions d'interès es va crear un volum amb totes les segmentacions. Es van assignar etiquetes úniques als píxels que pertanyien a diverses regions. En primer lloc, es va crear un volum inicial amb les mateixes dimensions que la imatge original i inicialitzat a -1. A continuació, les regions d'os + vascular i fons van rebre les etiquetes 1 i 0 respectivament, ja que aquestes dues regions no es solapaven.

Després, es va resoldre l'assignació dels píxels que no pertanyien a cap regió a la primera segmentació i que encara mantenien l'etiqueta -1. L'ordre d'assignació va ser determinat considerant el context clínic, prioritzant identificar primer la tiroides, després el múscul i greix, i finalment la resta de teixit tou. Per aquests píxels es va analitzar l'etiqueta més comú dels del seu voltant, per fer-ho es van desar en una llista les etiquetes dels veïns, excloent les etiquetes -1 (no assignat) i 0 (fons) per evitar assignar-les.

Aquest procés va permetre obtenir un volum amb totes les segmentacions i garantir l'assignació d'una sola etiqueta als píxels que pertanyien a múltiples regions, amb prioritat en funció del context clínic. Al volum s'etiquetaven les regions de la següent manera: 0 representava el fons, 1 les regions d'os i vascular, 2 la tiroides, 3 la resta del teixit tou i 4 múscul i greix. Així es van tenir els teixits segmentats en un volum i es podien desar com a màscares binàries per separat.

5.2.6. Segmentació semiautomàtica de la tiroides

Com hem dit, l'estructura d'interès a segmentar era la tiroides. Així doncs, com a abordatge paral·lel es va dissenyar un altre mètode per segmentar la tiroides, en aquest cas semiautomàtic. Es basa en la segmentació de la tiroides en una sola secció del TAC per després extreure la segmentació completa.

Obtenció de la màscara d'una llesca: el primer pas doncs, era obtenir la màscara de la tiroides d'una llesca on es veiés bé. Primer de tot, per millorar la visualització per a la segmentació manual, es van ajustar els valors de *Window i Level* per ressaltar el contrast de la tiroides. Les primeres proves es van fer utilitzant directament una secció segmentada del GT, però es volia fer-ho independent a segmentacions preexistents. Per això es va desenvolupar la següent metodologia per obtenir la màscara: primer es visualitzava la secció triada i es dibuixava manualment la silueta de la tiroides mitjançant la funció *drawfreehand()*. A continuació, es generava una màscara binària a partir del dibuix de la silueta creat per l'usuari, emprant la funció *createMask()*. A la Figura 16 podem veure la llesca on es veu la tiroides amb el dibuix a sobre (a) a partir del qual s'obté la màscara (b) al costat el GT (c).

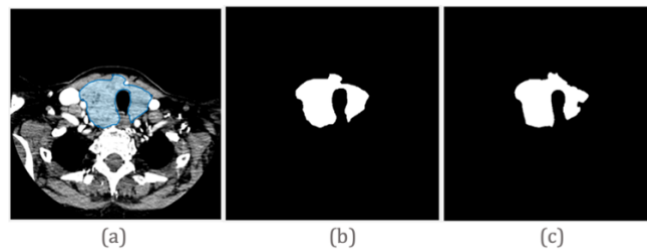


Figura 16. (a) dibuix de la tiroides sobre el TAC. (b) màscara obtinguda. (c) GT d'aquella llesca

Obtenció de la resta de la segmentació: per procedir amb la segmentació i facilitar-la es va aplicar una millora adaptativa del contrast al TAC. Per la segmentació es va fer servir l'algorisme *Active Contours*. Els paràmetres de l'algorisme: mètode, nombre d'iteracions i el factor de contractilitat, es van ajustar fent proves per aconseguir la millor segmentació possible.

La segmentació es va realitzar amb dos bucles *for*: un des de la màscara inicial fins a l'última secció de la tiroides (en sentit ascendent), i l'altre des de la màscara inicial fins a la primera secció de la tiroides (en sentit descendent). A la primera iteració s'utilitza la màscara obtinguda manualment. A cada altra secció l'algorisme utilitza la segmentació de la llesca anterior (obtinguda amb *Active Contours*) com a punt de partida, juntament amb la llesca corresponent del TAC per a la segmentació. Els resultats de cada secció segmentada es guarden en un volum que finalment conté tota la tiroides segmentada.

A banda del dibuix es van definir tres paràmetres que l'usuari podria ajustar introduint-los per teclat després de visualitzar el TAC. Això faria que la segmentació fos més general, més còmode i tingués en compte les preferències i avaluacions del metge. Aquests tres paràmetres eren: el número de la primera i última llesca on es veia la tiroides i el número de la llesca considerada

òptima per dibuixar-hi la segmentació. En el disseny de la metodologia es van triar els següents valors: primera llesca 20, última llesca 150 i llesca de segmentació 76.

5.2.7. Avaluació

Durant el procés d'obtenció de les segmentacions es van realitzar diverses proves per identificar els millors valors de diferents paràmetres. Aquestes proves es van avaluar de manera qualitativa, analitzant els resultats visualment. També però, gràcies a la disponibilitat del GT, es va poder fer una avaluació numèrica, el coeficient DICE. Es va calcular aquest coeficient DICE entre dues màscares en 3D. Pel que fa a la segmentació de la tiroides, es va disposar del GT com a referència. En el cas de l'estructura òssia i vascular, es va crear una màscara combinant totes les segmentacions òssies i vasculares del GT. Aquests dos tipus de segmentació eren particularment importants des d'un punt de vista clínic i va ser molt positiu poder quantificar-ne la qualitat. Pel que fa a les altres segmentacions, no es va poder de calcular un valor de coeficient DICE, l'avaluació es va basar en una anàlisi qualitativa.

5.2.8. Obtenció de models 3D a partir dels volums en MATLAB

Un cop obtingudes les millors segmentacions, es van emmagatzemar els models en format STL per visualitzar-los i preparar-los per la impressió 3D. Inicialment, es va optar per un enfocament utilitzant Python, finalment es va implementar aquesta part també amb MATLAB per simplificar la metodologia i evitar l'ús de tants recursos diferents. Aquest pas final va requerir temps i recerca per trobar la millor manera de fer-ho. Al llarg d'aquest procés es van trobar reptes per conservar les dimensions i per obtenir segmentacions correctament orientades. Aquests problemes es van trobar quan es van visualitzar els arxius dels models obtinguts en 3D per primer cop. Amb l'ajuda del metge, es va identificar l'orientació correcta i es va modificar la metodologia per invertir la segmentació obtinguda i obtenir-la correctament orientada.

Per obtenir els models, després de provar diversos fitxers de funcions externs es va recórrer al fitxer d'Adam A *Converting a 3D logical array into an STL surface mesh* (39) perquè s'adaptava al pes que ocupaven els nostres volums. Aquest arxiu té funcions que permeten convertir una matriu lògica 3D en una malla de superfície STL. Primer, es va establir un sistema de coordenades 3D per conservar les dimensions originals, utilitzant les dades com l'espaiat de píxels i les dimensions inicials de la imatge. A continuació, es va utilitzar la funció *CONVERT_voxels_to_STL*, a la qual se li va passar la segmentació corresponent i el sistema de coordenades definit. Aquesta funció identifica els vòxels límit i construeix les superfícies entre aquests vòxels i els seus veïns. Com a resultat, s'obté el model en format STL.

SEGONA PART: PROCESSAMENT DELS MODELS I IMPRESSIÓ 3D

Un cop obtingudes les segmentacions en format STL amb MATLAB, el proper pas va ser processar aquests models, imprimir-los en 3D i avaluar els resultats obtinguts.

5.2.9. Visualització i processament dels models

El primer que es va fer va ser obrir els models obtinguts i la segmentació del GT al 3D Slicer. Aquesta eina ens va permetre obrir els arxius STL. Primer es van visualitzar com a volums per a una inspecció inicial de resultats, amb l'objectiu d'assegurar una comparació coherent amb el GT. Es va utilitzar la funcionalitat de 'Transformations' per ajustar-los i orientar-los segons les mateixes referències que el GT. A la Figura 17 podem veure la utilitat d'aquestes transformacions, que ens van permetre visualitzar la nostra segmentació (os + vascular i la tiroides obtinguda amb segmentació automàtica) al costat del GT (a l'esquerra).

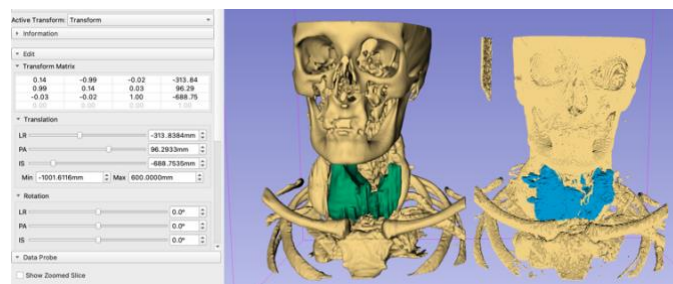


Figura 17. Eina de transformacions, GT i la segmentació obtinguda

Les segmentacions obtingudes presentaven un nivell de detall a nivell de píxels a causa de les tècniques utilitzades amb MATLAB per obtenir-les. Per tant, va ser necessari aplicar un suavitzat bàsic per reduir la grandària dels arxius STL i disminuir el nivell de detall, amb l'objectiu de facilitar el procés d'impressió. Això es va fer sobre els models de la tiroides i sobre un tros de l'estructura òssia + vascular. Per aconseguir-ho, es van obrir els arxius en format 'Segmentation' i es va utilitzar el mòdul 'Segment editor' per aplicar la funció 'Smoothing' a tota la segmentació de cop per suavitzar els contorns, aquest mateix suavitzat és el qual s'havia aplicat al GT.

5.2.10. Impressió

Després del processament de les segmentacions generades amb MATLAB va arribar el moment de la impressió dels prototips de les guies quirúrgiques. Tenint en compte factors com la grandària, el temps d'impressió, l'interès clínic i la disponibilitat del GT, es va optar per imprimir el model de la tiroides obtingut semiautomàticament i automàticament i el seu GT.

Preparació de l'arxiu per a la impressió: per preparar aquests arxius per a la impressió en 3D es va utilitzar el programari BCN3D Stratos. Es van importar els arxius en aquest programa, es van definir els materials per als dos extrusors de la impressora i altres paràmetres com l'alçada de capa i l'emplenament de les peces. També es van prendre decisions sobre la millor disposició dels suports tenint en compte factors com els angles i l'estructura. Aquests suports garanteixen una bona impressió, sobretot en les zones complicades. Així doncs, es va sacrificar temps d'impressió per posar suports més robustos i complexos que asseguressin un bon resultat.

Els paràmetres de configuració emprats per a la impressió van ser els mateixos que els utilitzats en l'estudi previ realitzat per Cruz Peñas A. (5) on s'havia trobat els valors òptims per obtenir la millor qualitat de la peça. A la Figura 18 es poden observar els paràmetres que es van aplicar, a l'ANNEX F es veu el contingut més gran. Cal destacar que com s'estava fent un primer prototip, es va prioritzar la velocitat d'impressió per sobre de la necessitat d'una gran qualitat de detall.

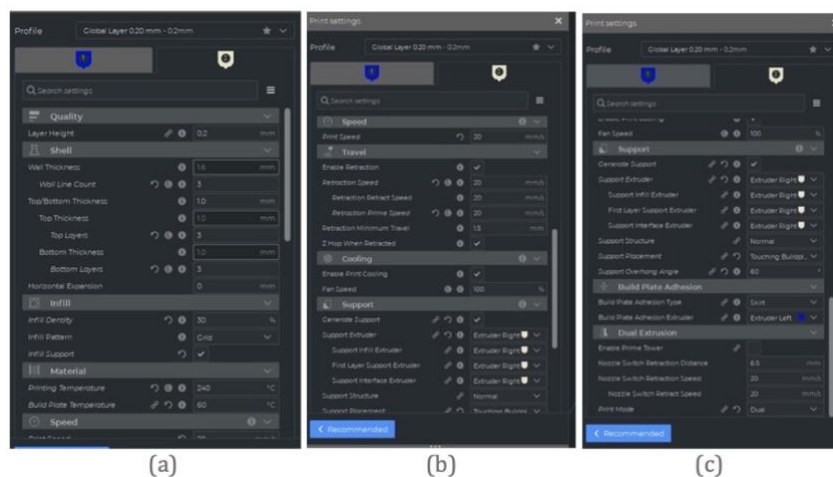


Figura 18. Paràmetres per a la impressió

Impressió: un cop preparat l'arxiu, es va emmagatzemar en una targeta SD per obrir-lo des de la impressora i procedir amb la impressió. Després es va posar laca a la plataforma per millorar l'adhesió i es va iniciar la impressió. Per últim només s'havia d'esperar el temps indicant, calia mantenir una supervisió constant per detectar qualsevol possible problema.

Els extrusors escalfaven el material, des de l'extrusor dret sortia el PVA per imprimir el suport i des de l'extrusor esquerre el PLA de color blau per imprimir la peça; aquestes extrusions s'alternaven per la impressió capa a capa. Durant la impressió del suport es van enfrontar diversos problemes en les proves com parts embolicades i zones on el material no s'imprimia adequadament. Després d'analitzar aquests problemes es va concloure que es podien atribuir a possibles problemes de la impressora, potser relacionats amb l'extrusor. Un cop completat el

temps d'impressió es retirava la peça de la plataforma de la impressora i es submergia en aigua per dissoldre el PVA del suport i aconseguir la peça final. A la Figura 19 (a) es pot veure la impressora imprimint la peça, en blanc el material de suport i en blau la peça. A la Figura 19 (b) i (c) podem veure dos exemples de problemes en la impressió del material de suport.

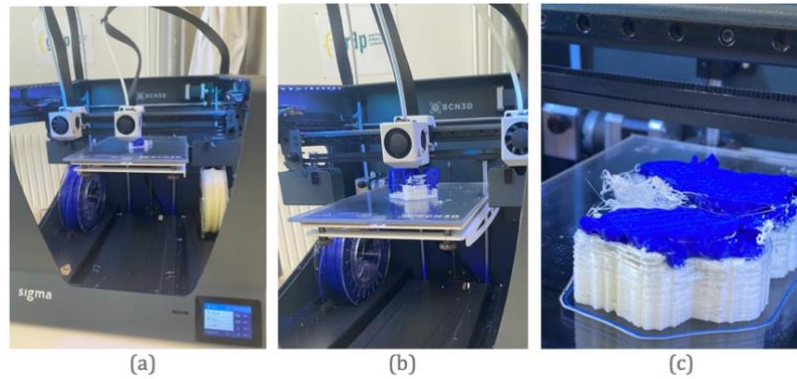


Figura 19. (a) procés d'impressió. (b) i (c) problema en la impressió del material de suport.

5.2.11. Escaneig

Després d'obtenir els prototips de les guies quirúrgiques impreses es va procedir a avaluar-ne els resultats escanejant les peces: tiroides automàtica, tiroides semiautomàtica i GT, per obtenir-ne models digitals. Aquest procés es va realitzar mitjançant l'ús de l'escàner Einscan Pro 2x Plus, seguint les



Figura 20. Escàner i software d'escaneig

instruccions d'un manual (40). Per millorar la qualitat de l'escaneig es va aplicar una capa de pintura en esprai a les peces abans de l'escaneig. El procediment d'escaneig va consistir en col·locar la peça a la base giratòria i seleccionar les opcions 'fixed scan' i 'non texture scan'. A la Figura 20 es pot observar l'escàner i l'ordinador connectat amb el programari complementari Shining 3D. Calia ajustar la il·luminació per aconseguir una bona focalització de la llum a la peça. Es buscava que les marques blanques de la taula giratòria es mostressin de color vermell a la pantalla però la peça no, com es pot veure a la part superior esquerra de la Figura 21 (a).

Per determinar la precisió de l'escaneig es va seleccionar el nombre de passos de la taula giratòria (coneguts com 'turntable steps'), que indica quantes captures es realitzarien en 360 graus. Es van realitzar tres proves (4, 8 i 12) i es va optar per un nombre de 12 passos, perquè s'obtenien millors resultats. Un cop completat l'escaneig es va verificar l'exactitud i, amb la comanda 'Shift + botó esquerre', es van seleccionar i eliminar les superfícies externes sobrants, com es mostra a la Figura 21 (b).

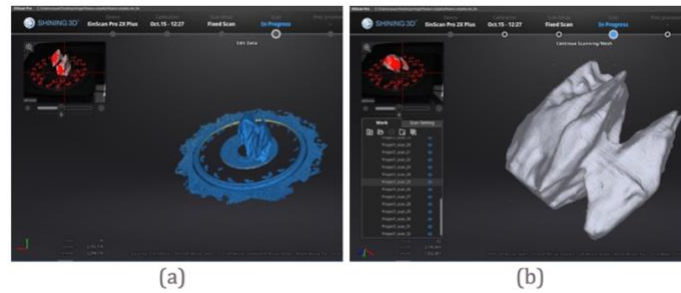


Figura 21. (a) resultat de l'escàner abans de processar-lo. (b) totalitat de la peça escanejada i processada

A continuació, es va realitzar un segon escaneig en una posició diferent de la peça per aconseguir l'escaneig complet de tota la superfície. Els dos escanejos es van unir i alinear automàticament, tancant el cos i formant la peça completa.

Un cop obtingut el model escanejat es va fer servir l'opció 'Third-party software' per obrir-lo al programa Geomagic Essentials, on s'hi va realitzar el processament. Es va utilitzar l'eina 'mesh doctor' per omplir d'un en un petits forats i imperfeccions generades pel procés d'escaneig o per la malla del cos. Aquesta eina detecta les anomalies automàticament i les mostra en vermell i groc. A la Figura 22 podem veure l'eina i la peça amb les imperfeccions. Finalment, es va obtenir el model final de la peça escanejada.

5.2.12. Comparació 3D/ Avaluació

Els arxius STL es van importar i desar en un arxiu de SolidWorks. Amb la finalitat de comparar-los amb el GT es va crear un assemblatge entre el model de la tiroides que volíem avaluar i el GT. Es van fer comparacions entre els models en format STL escanejats i els models originals.

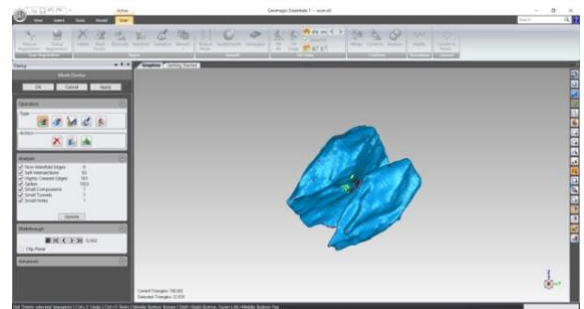


Figura 22. Eina 'meshdoctor'

Utilitzant les eines de rotació i translació de SolidWorks, es van alinear els dos cossos per fer-los coincidir el màxim possible. A la Figura 24 es poden veure els dos cossos a SolidWorks abans de ser alineats: el GT en lila i la tiroides obtinguda automàticament en gris. Seguidament, es va aplicar la funció 'body compare' utilitza una escala de colors per mostrar les diferències en mil·límetres entre els dos models, es van comparar la tiroides obtingudes respecte el GT. La llegenda de colors al costat de la peça indicava quants mil·límetres corresponien a cada color, amb diversos rangs de tolerància: +-5mm, en total 10 mm i +-10mm, en total 20 mm. A més, es va incloure un rang que abastava tota la peça amb l'objectiu de visualitzar l'error màxim. Aquest procediment va ser dut a terme seguint les instruccions del (41) A la Figura 23 podem veure la

opció de 'body compare' i els diferents paràmetres que es poden escollir: l'opció per seleccionar els dos cossos a comparar i la barra per determinar el rang de tolerància en la comparació.



Figura 24. Alineació entre el GT (en lila) i el nostre model

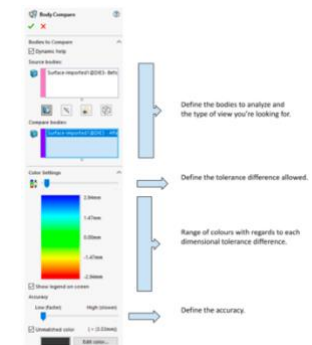


Figura 23. Eina 'body compare' de SolidWorks (42)

L'avaluació del coeficient DICE quantifica la similitud de la segmentació amb el GT en forma de percentatge (sobre 1). Aquesta comparació de cossos amb SolidWorks ens va permetre quantificar l'error en mil·límetres i saber amb més detall on eren els errors.

5.2.13. Validació

Aquesta metodologia de segmentació va ser desenvolupada amb un enfocament de prova i error basant-se en el cas 1. Es va decidir doncs, avaluar com funcionava el codi de segmentació en un altre escenari cas, que corresponia a un cas de Goll gegant cervical-endotoràcic. L'objectiu era avaluar la robustesa i capacitat de la metodologia de ser generalitzada. A través d'aquesta validació es buscava obtenir informació per millorar i adaptar la metodologia. Es van aplicar les mínimes modificacions, es van fer ajustos als directoris per a la lectura de les noves imatges, però no es van canviar els llindars ni els paràmetres i valors utilitzats. Es volia provar la metodologia tal com havia estat originalment dissenyada i poder avaluar amb precisió la seva efectivitat. A la Figura 25 podem veure un pas de l'obtenció de la segmentació semiautomàtica en la validació.



Figura 25. Llesca 70 del cas 2 amb la segmentació de la tiroides

5.2.14. Guia per l'usuari

Durant tot el desenvolupament de la metodologia per a l'obtenció de les guies quirúrgiques, s'ha anat elaborant un protocol per obtenir aquestes guies en un context més realista. Avaluant quan i com el metge podria intervenir i afegir valor. Aquest protocol està destinat a ajudar el personal sanitari, per això s'ha buscat que sigui viable i senzill de seguir. A l' ANNEX F es proporciona la guia per al personal sanitari, explicativa i visual. Així, a banda de formar part integral de la metodologia, aquest protocol representa un resultat molt important d'aquest projecte.

CAPÍTOL 6. RESULTATS

En aquest capítol es descriuen els resultats obtinguts aplicant la metodologia descrita per la segmentació d'imatges radiològiques i la posterior obtenció de prototips de guies quirúrgiques. Primer, es presenta l'evolució dels resultats de la segmentació a través de diverses etapes del projecte que han derivat en una solució final, resultats a la secció 6.2.

6.1. Evolució dels resultats de la segmentació

Com s'ha descrit, la metodologia ha estat desenvolupada fent diferents proves i millores per trobar els millors resultats. A continuació es presenten els resultats i l'evolució que han tingut durant el procés i les diferents decisions. Algunes d'aquestes proves han estat avaluades quantitativament mitjançant mètriques com el coeficient DICE respecte el GT i d'altres qualitativament.

6.1.1. Segmentació automàtica

A la Figura 26 (b) podem veure l'evolució qualitativa de la tiroides respecte el GT, Figura 26 (a). En aquesta comparació només es veu una llesca, però es va anar valorant els volums en conjunt per triar el millor post-processament.

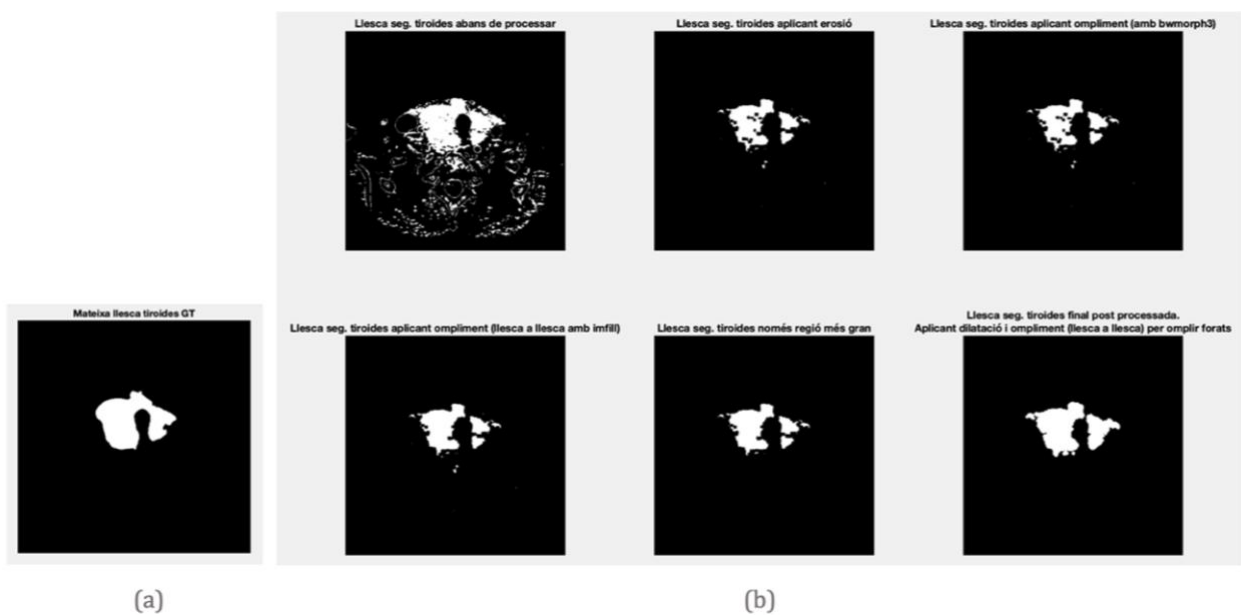


Figura 26. (a) llesca del GT (b) post-processament de la llesca

A continuació hi ha la Taula 5 amb l'evolució del DICE de la tiroides segons algunes de les proves abans d'arribar al post-processament triat. Es van fer diverses proves canviant alguns paràmetres dels 3 passos principals del post-processament (primera erosió, ompliment de forats inicial, i dilatació i ompliment final). Aquestes proves quantificades es van realitzar després d'haver fet proves preliminars observant l'evolució en les imatges.

Element Estructural 1 (primera erosió)	Imfill (llesca a llesca)	Element Estructural 2 (dilatació i ompliment final)	DICE	Element Estructural 1 (primera erosió)	Imfill (llesca a llesca)	Element Estructural 2 (dilatació i ompliment final)	DICE
'diamond', 6	Sense fer-ho	Sense fer-ho	0.6518	'square', 6	Sense fer-ho	Sense fer-ho	0.6806
'diamond', 6	26, 'holes'	Sense fer-ho	0.6838	'diamond', 6	8, 'holes'	Sense fer-ho	0.6838
'square', 4	26, 'holes'	Sense fer-ho	0.6905	'square', 5	26, 'holes'	Sense fer-ho	0.6702
'square', 6	26, 'holes'	Sense fer-ho	0.7203	'cube', 4	8, 'holes'	'sphere', 4	0.6743
'sphere', 6	4, 'holes'	'cube', 4	0.5148	'cube', 6	8, 'holes'	'square', 4	0.4623
'cube', 6	4, 'holes'	'diamond', 6	0.6380	'square', 6	8, 'holes'	sphere', 4	0.6580
'square', 6	4, 'holes'	'diamond', 4	0.7016	'square', 6	8, 'holes'	'diamond', 6	0.7884
'diamond', 6	8, 'holes'	'square', 4	0.8147	'square', 6	4, 'holes'	'diamond', 4	0.7016
'diamond', 6	26, 'holes'	'square', 4	0.8247	'diamond', 6	26, 'holes'	'diamond', 4	0.8263
'square', 6	26, 'holes'	'square', 4	0.8276	'square', 6	26, 'holes'	'diamond', 4	0.8321
'square', 6	26, 'holes'	'diamond', 4	0.8541 *				

Taula 5. Evolució del DICE al post-processament de la tiroides

* Unit amb la resta del codi de segmentació

6.1.2. Segmentació semiautomàtica

A la Taula 6 es mostra l'evolució del coeficient DICE en la segmentació semiautomàtica, en la qual es van ajustar diferents paràmetres de la funció *Active Contours*.

Nombre d'iteracions	Mètode	Contraction Bias	DICE	Nombre d'iteracions	Mètode	Contraction Bias	DICE
20	Chan-Vase	0 (default)	0.2169	50	Chan-Vase	0 (default)	0.1600
100	Edge	0.3 (default)	0.5108	50	Edge	0.3 (default)	0.5847
15	Edge	0.3 (default)	0.6942	15	Edge	0.15	0.7349
20	Edge	0.10	0.7192	20	Edge	0.20	0.7455
20	Edge	0.17	0.7694	20	Edge	0.17	0.7013 (Contrast adapthisteq)
20	Edge	0.17	0.8028 (Aplicant contrast histeq a la img original)	20	Edge	0.17	0.7949*

Taula 6. Evolució del DICE en la segmentació semiautomàtica

*Realitzant la màscara dibuixant, el valor és el màxim trobat, depèn de la precisió del dibuix.

6.1.3. Arxiu d'impressió abans de suavitzar els models

Fent la prova d'imprimir els fitxers amb els models STL directament obtinguts del MATLAB, sense aplicar el suavitzat vam obtenir el següent arxiu d'impressió mostrat a la Figura 27.

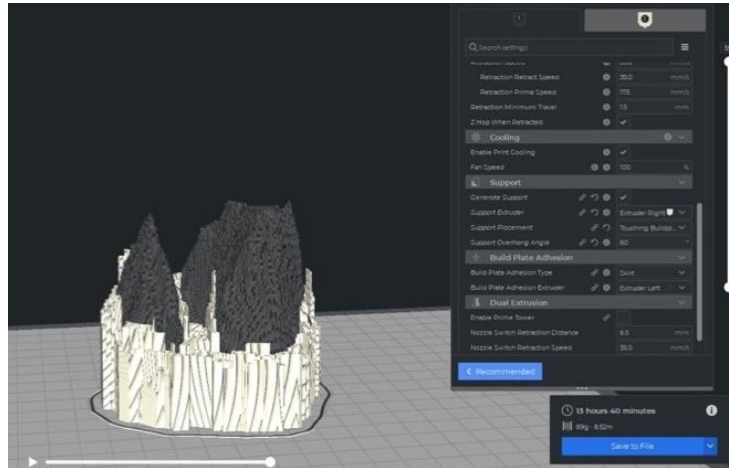


Figura 27. Arxiu d'impressió de la tiroides semiautomàtica abans de suavitzar

Podem veure l'arxiu d'impressió de la peça (tiroides semiautomàtica) abans de suavitzar el model, un temps de més de 13 hores i molt material de suport. En veure aquest primer resultat va ser quan es va valorar la necessitat d'aplicar un suavitzat de suavitzat al model.

6.2. Resultats de la solució triada

6.2.1. Resultats de la segmentació amb MATLAB

De la segmentació automàtica s'obté un volum en MATLAB amb les estructures diferenciades etiquetat: 0 el fons, 1 os i vascular, 2 la tiroides, 3 resta del teixit tou. Aquest volum es podria desar i obrir en 3D Slicer en forma de segmentació. Com que l'interès està en obtenir models CAD, s'obtenen els models STL de cadascuna de les estructures en format STL presentats a la Taula 7.

A partir de segmentació automàtica	Segmentació de: la tiroides, os + vascular*, teixit tou sense la tiroides, múscul i greix. *també desem una segmentació os + vascular però de les llesques de la zona d'interès, molt útil per ubicar en l'espai la tiroides
A partir de segmentació semiautomàtica	Segmentació de la tiroides

Taula 7. Models obtinguts

Podem veure exemples de la visualització del resultat de les segmentacions en MATLAB amb l'eina de visualització de volums 'sliceViewer' que permet visualitzar totes les llesques a la Figura 28.

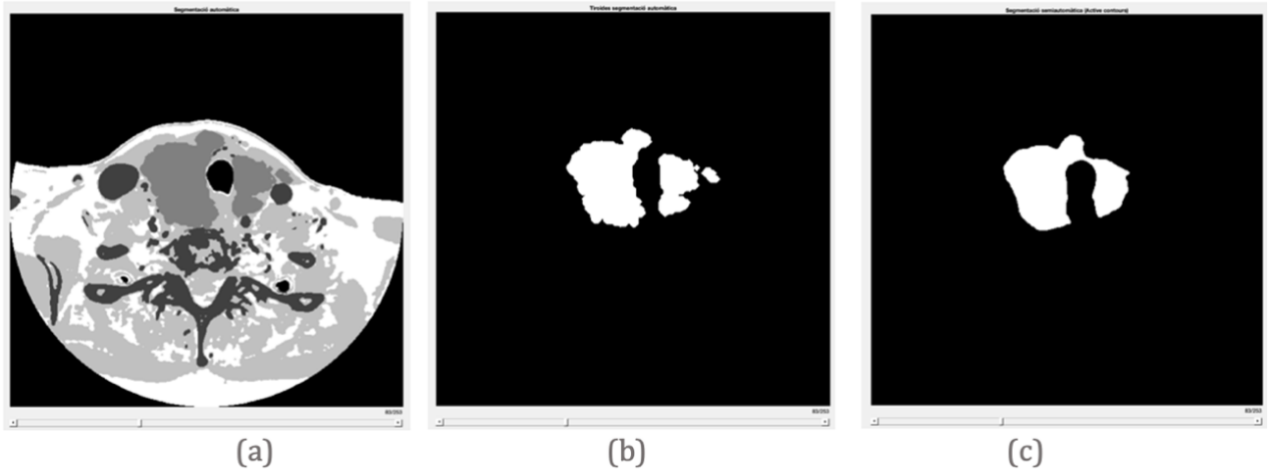


Figura 28. Llesca de (a) totes les segmentacions juntes. (b) tiroides automàtica. (c) tiroides semiautomàtica

6.2.2. Avaluació DICE segmentacions automàtica i semiautomàtica:

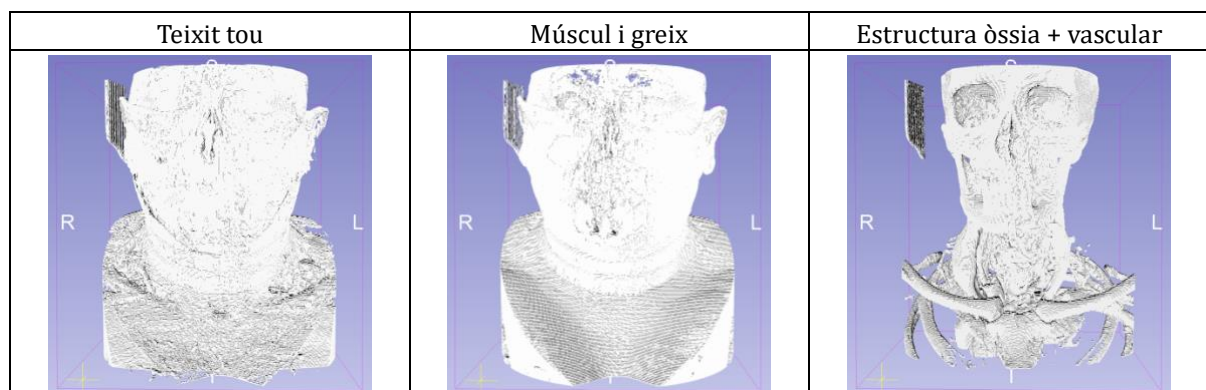
De les estructures que se'n podia calcular el coeficient DICE s'obtenen els resultats a la Taula 8

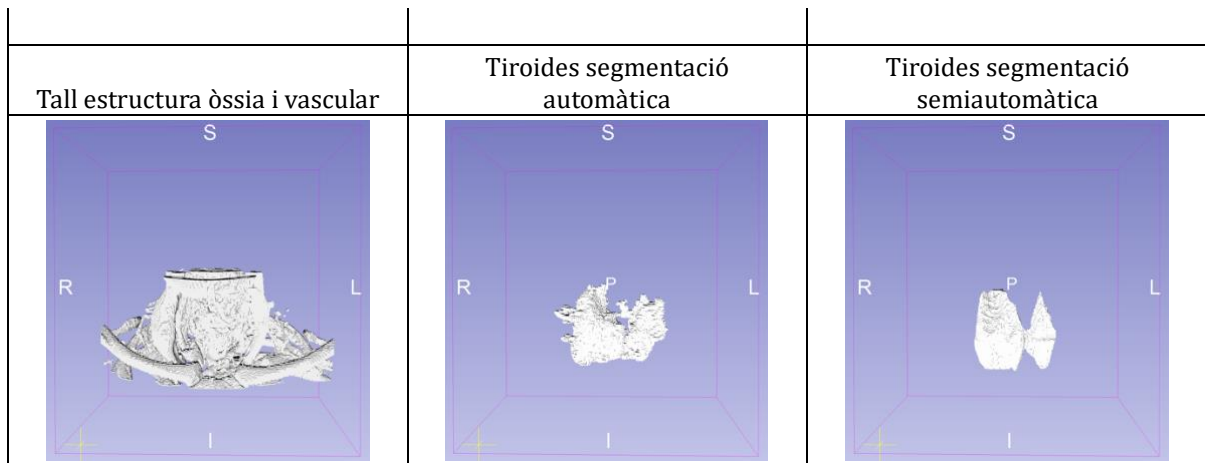
Estructura	Coefficient DICE
Tiroides a partir de segmentació semiautomàtica (posteriorment impresa)	0.7949
Tiroides a partir de segmentació automàtica (posteriorment impresa)	0.8541
Estructura òssia i estructura vascular a partir de segmentació automàtica	0.8518

Taula 8. Valors de coeficient DICE de les segmentacions

6.2.3. Models segmentacions pre i post suavitzat

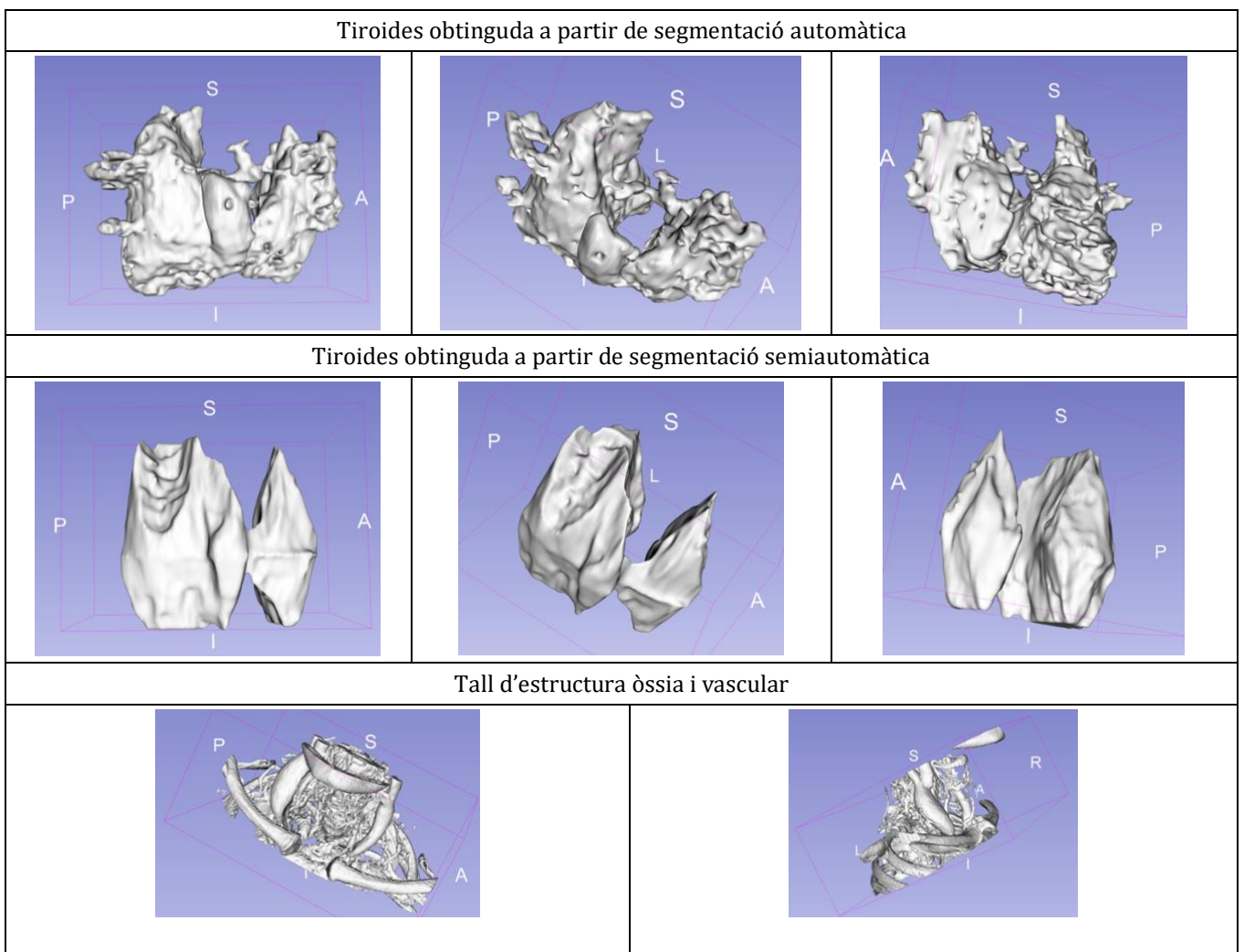
Un cop oberts directament al 3D Slicer els arxius STL generats en la segmentació amb MATLAB obtenim els resultats presentats a la Taula 9.

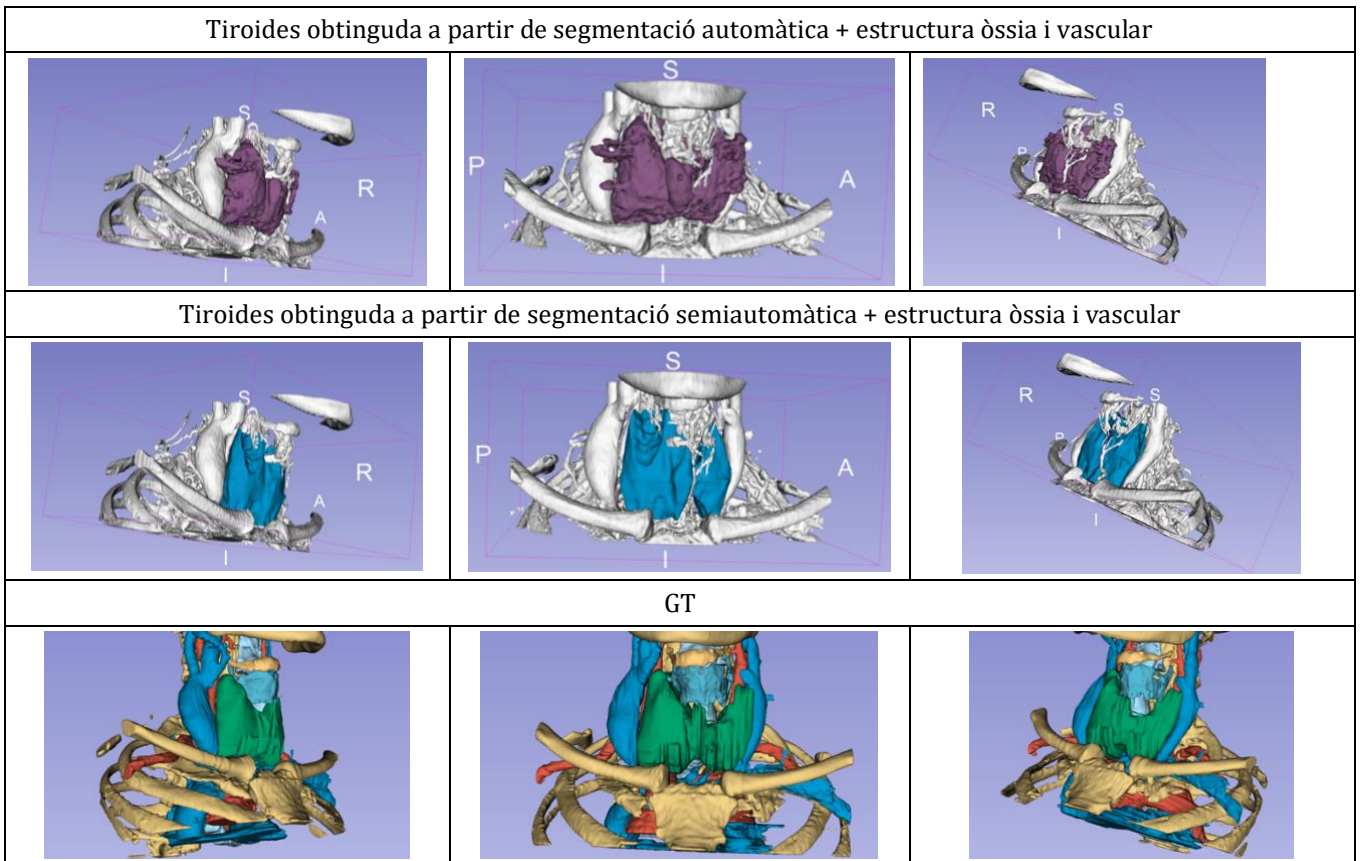




Taula 9. Models 3D sense processar

A la Taula 10 podem veure algunes vistes dels models de més interès i amb millors resultats (tiroides i estructura òssia + vascular) un cop suavitzats.





Taula 10. Models 3D de les segmentacions un cop suavitzats

6.2.4. Arxius d'impressió

A la Figura 29 es veu el resultat dels arxius d'impressió, la peça de la tiroides amb els suports i el temps d'impressió (5h i 36 minuts tiroides semiautomàtica, 11 hores i 50 minuts automàtica).

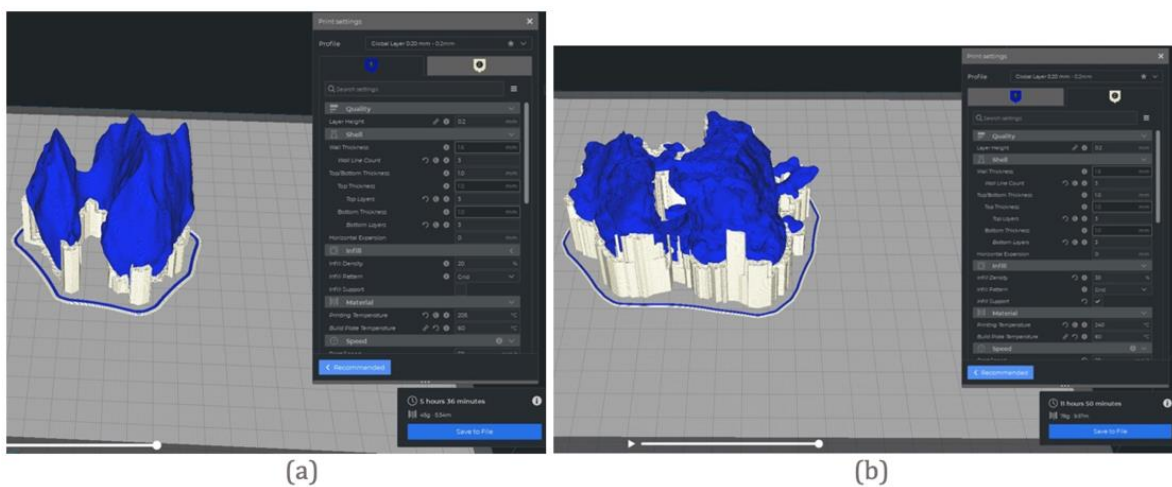






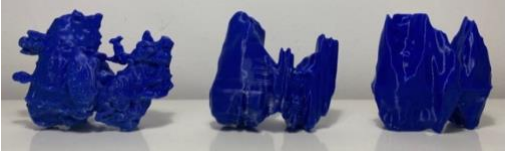




Figura 29. Arxius d'impressió (a) tiroides semiautomàtica. (b) tiroides automàtica.

6.2.5. Prototips impresos

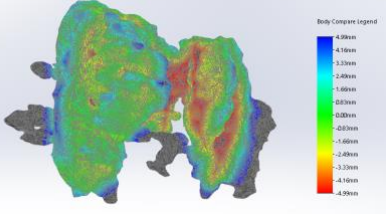
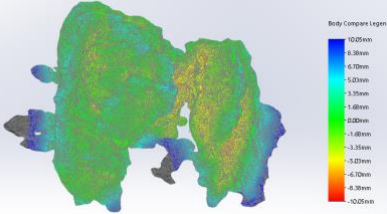
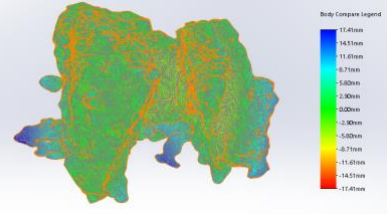
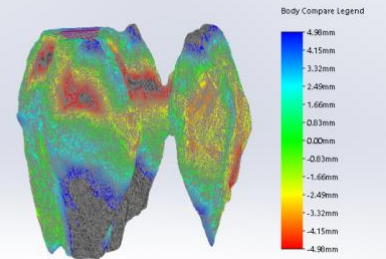
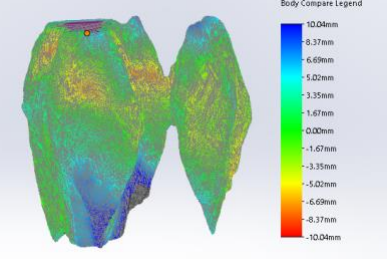
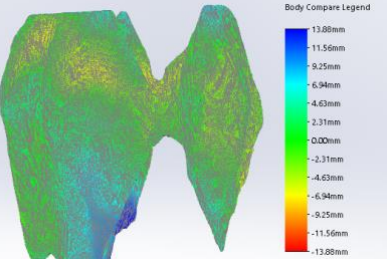
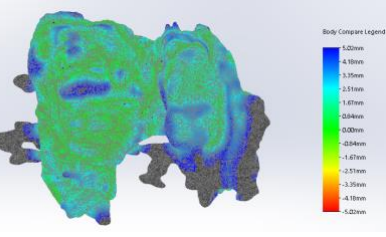
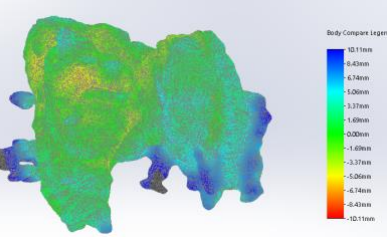
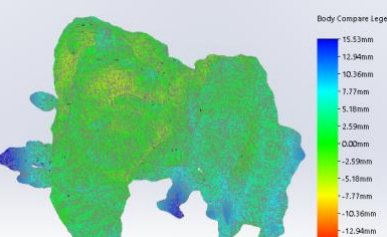
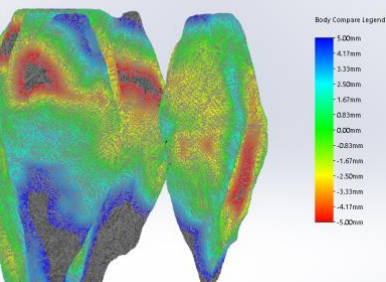
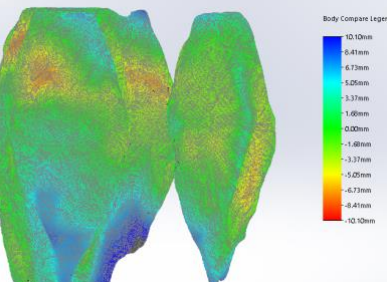
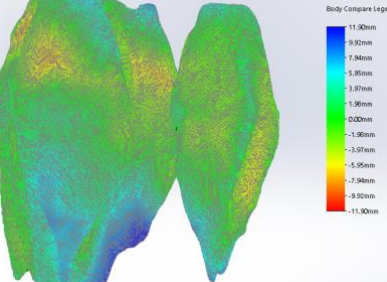
A la Taula 11 podem veure el resultat dels prototips impresos, ja retirat el material de suport, es va imprimir també l'arxiu d'impressió del GT. De l'escanejat d'aquests prototips s'ha obtingut els models en format STL de l'escanejat respectius.

Impressió tiroides automàtica		Impressió tiroides semiautomàtica	
			
Impressió tiroides GT		Impressions juntes	
		  	

Taula 11. Prototips impresos

6.2.6. Avaluació amb SolidWorks dels models i dels prototips escanejats

A la Taula 12 podem veure els resultats de l'avaluació en mil·límetres realitzada amb SolidWorks. Amb diferents rangs de tolerància descrits sota cada imatge. L'escala de colors a la dreta dels models representa en colors la diferència en mil·límetres. El color verd, que engloba la majoria dels models, representa diferències més properes al 0 i per tant, més similitud respecte el GT.

Comparació GT-Tiroides seg. Automàtica		
		
10mm	20mm	Tot (34,8mm)
Comparació GT-Tiroides seg. Semiautomàtica		
		
10mm	20mm	Tot (26,76mm)
Comparació GT -Tiroides seg. Automàtica (Scans)		
		
10mm	20mm	Tot (31,1mm)
Comparació GT-Tiroides seg. Semiautomàtica (Scans)		
		
10mm	20mm	Tot (23,8mm)

Taula 12. Comparació en mm dels models amb el GT

6.2.7. Resultats de la validació de la metodologia de segmentació

A continuació es presenten els resultats de la validació de la metodologia de segmentació amb el segon cas clínic. Segons ha descrit el metge, aquest cas presenta un creixement extremadament gran de la tiroides i altres problemes derivats. S'ha obtingut les mateixes estructures presentades a la Taula 7. Tot i no haver obtingut resultats prometedors en el teixit tou i múscul i greix, a la Figura 30 en presentem els models juntament amb la de l'estructura vascular i òssia sencera

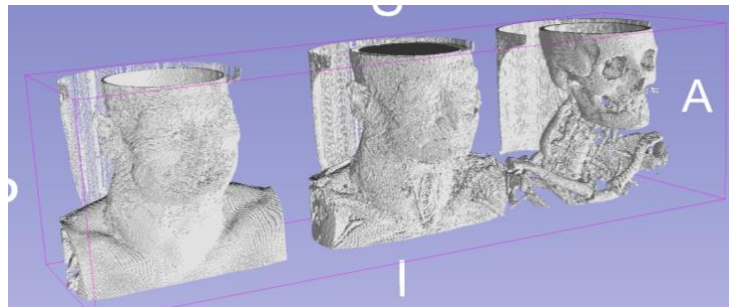


Figura 30. Segmentacions múscul i greix, teixit tou i estructura òssia + vascular.

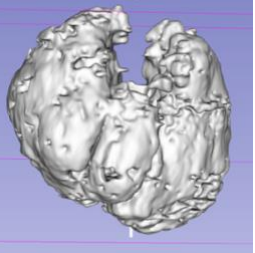
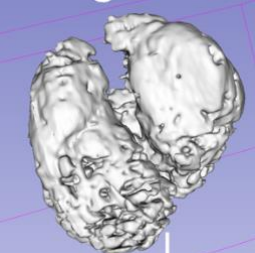
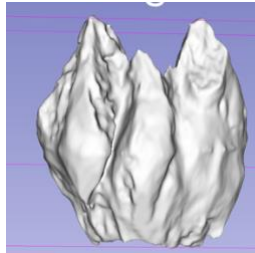
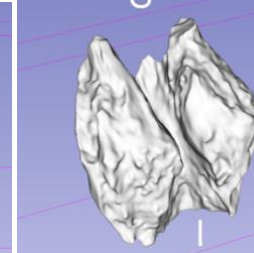
Ens centrarem però en els resultats de l'estructura òssia i vascular i la tiroides, que és on tenim més interès i de les quals podem calcular el DICE gràcies al GT, i que es presenten a la Taula 13.

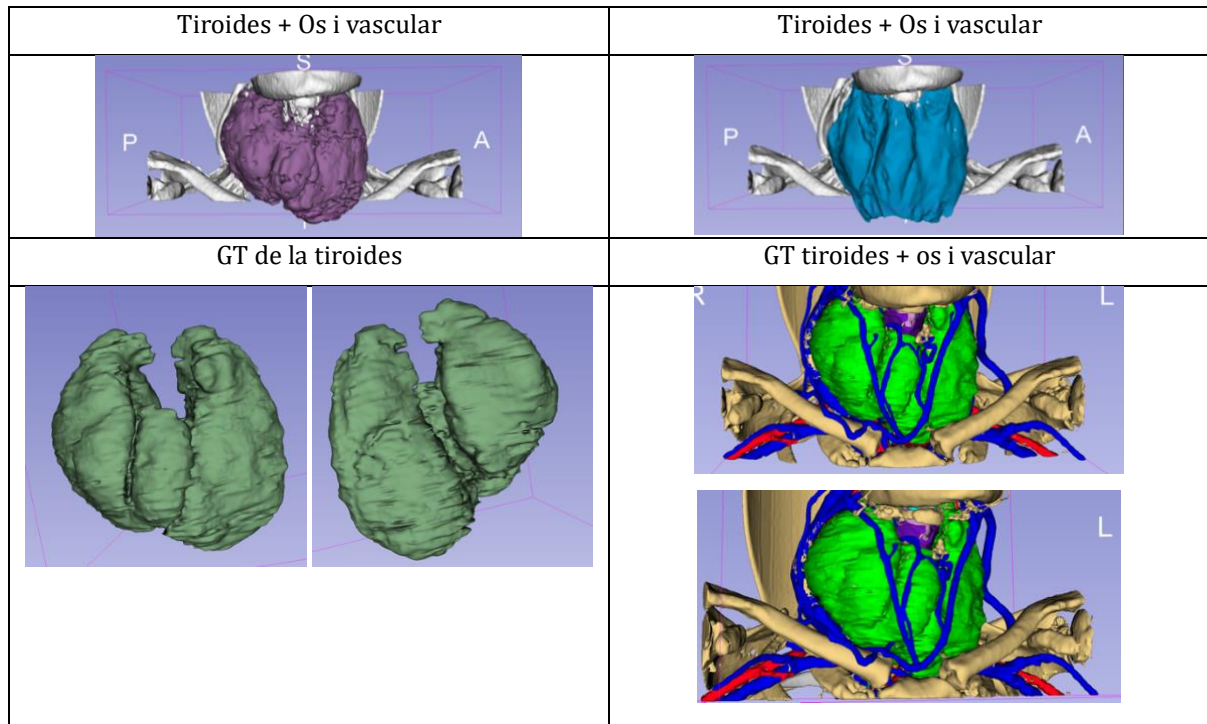
Estructura	Coefficient DICE
Tiroides a partir de segmentació semiautomàtica	0.7854
Tiroides a partir de segmentació automàtica	0.9212
Estructura òssia i vascular a partir de segmentació automàtica	0.8524

Taula 13. Coeficient DICE de les segmentacions del cas 2.

Tot i que es pretenia no realitzar canvis en els codis, s'ha realitzat un petit ajustament a la limitació de les llesques per a la segmentació automàtica tiroides per adaptar-se a les seves grans dimensions i evitar tallar-la. Aquest canvi va consistir en passar de limitar la tiroides de la llesca 47 a la 130, a limitar-la de la llesca 11 a la 47 (definit a partir de visualitzar el TAC).

Presentem a la Taula 14 les imatges dels models os i vascular i tiroides ja suavitzats.

Tiroides segmentada automàticament		Tiroides segmentada semiautomàticament	
			



Taula 14. Models 3D suavitzats de les segmentacions

CAPÍTOL 7. DISCUSSIÓ

7.1. Discussió dels resultats obtinguts

Al capítol 6 s'han presentat els resultats obtinguts al projecte. Primerament, s'ha plantejat l'evolució dels resultats per arribar a la solució triada, tenint en compte el coeficient DICE com a mètrica d'avaluació. Moltes decisions i resultats assolits s'han valorat de manera qualitativa i posant solució a prioritats com el temps i la viabilitat d'impressió dels prototips, entre d'altres.

Amb relació als resultats de la solució triada es destaca l'obtenció d'una metodologia de segmentació automàtica i una altra semiautomàtica amb capacitat de segmentar la tiroides amb coeficients DICE superiors a 0.78, fins a arribar a 0.92. Per quantificar aquests resultats i conèixer més detalls es realitza una comparació en mil·límetres entre GT i els prototips resultants impresos i abans d'imprimir. S'observa una diferència màxima de +-17,4 mm. Aquests mil·límetres màxims d'error són els obtinguts en la tiroides a partir de segmentació automàtica, píxels de la tràquea i del voltant de la tiroides que no es van poder eliminar amb post-processament.

Tenint en compte un rang de tolerància de ± 5 mm entre el GT i la peça, la major part del model es troba dins, de color verd, en totes les segmentacions. L'avaluació qualitativa en 3D amb comparació al GT, tan digital com física, ha estat un altre indicador de l'èxit de la segmentació.

Els resultats de la segmentació de l'estructura òssia i vascular presenten resultats de coeficient DICE al voltant de 0.85. El prototip d'aquesta segmentació no s'ha imprès ni s'ha avaluat comparativa en mm. La funció de la segmentació d'aquesta estructura dins el nostre projecte era servir de referència espacial i de mida per la tiroides. En el cas que es presentés un cas on aquesta estructura fos l'interès, se'n podria fer les corresponents impressions i avaluacions donat els bons resultats que s'intueixen valorant que el coeficient DICE obtingut és proper a 1. Cal fer una puntualització en la impossibilitat de segmentar per separat l'estructura òssia de la vascular donat el contrast intravenós administrat en la prova. Respecte els altres teixits segmentats: resta del teixit tou i múscul i greix, s'ha avaluat els resultats qualitativament i no són segmentacions que donin informació clau. També es pot mencionar l'èxit, tot i que no suposi un gran repte, de la segmentació del fons al TAC.

Els bons resultats de la metodologia de segmentació en la validació d'un segon cas demostren que la metodologia té capacitat de generalitzar-se. El segon cas presenta una tiroides molt gran i amb una forma diferent al cas escollit i tot i això, usant la mateixa metodologia s'ha obtingut una molt bona segmentació.

S'ha notat una millor capacitat de segmentació del mètode automàtic respecte el semiautomàtic. Tot i que es podria esperar a la inversa, cal destacar que en un treball futur la segmentació semiautomàtica podria extrapolar-se a altres estructures, utilitza contorns i majoritàriament és independent a valors d'intensitat. En canvi, la segmentació automàtica depèn de l'indar obtinguts en l'anàlisi del TAC del cas 1 i si canviessin molt les característiques del TAC, sembla tenir menys possibilitats de funcionar. Actualment només s'usa el contorn definit per l'operador d'una llesca, en un futur se'n podrien usar múltiples, que farien millorar els resultats.

Amb relació als prototips obtinguts, s'obtenen peces de mida real de les estructures segmentades. S'observen restes de material de suport que no han sigut retirades del tot bé. Amb els recursos emprats, les peces impreses han tardat entre 5 i 12 hores, es podria considerar llarg si per exemple els prototips es requerissin de manera urgent per a una planificació. Amb prototips d'aquesta precisió es fa una primera aproximació a l'obtenció d'una guia que permeti planificar una cirurgia. Oferint prototips que repliquen la mida, una bona aproximació de la forma i la ubicació respecte l'estructura òssia i vascular, bastant precisa, de la tiroides.

El resultat principal del projecte és l'obtenció d'un protocol per a l'obtenció de prototips de guies quirúrgiques de la zona cap-coll a partir d'un TAC, incloent-hi una metodologia de segmentació automàtica per segmentar teixits i la tiroides. Donat que al projecte es partia de les imatges radiològiques proporcionades pel metge, es vol destacar que cada descobriment, problema, avanç i decisió es considera un resultat del projecte tenint en compte el punt de partida.

7.2. Limitacions

La limitació principal podria ser la manca de casos amb el seu GT. Inicialment això va suposar una limitació en la metodologia escollida, descartant les metodologies basades en *Deep Learning*. En veure els bons resultats obtinguts, es considera una limitació per no poder avaluar la metodologia de segmentació amb altres casos. Amb altres TACs, tant similars com diferents i el seu GT, es podria realitzar una avaluació més significativa. Permetria també fer un disseny més general, fent ajustaments i valorant resultats per fer una segmentació acurada independentment de les diferències entre imatges. També seria interessant fer-ne proves en TACs de persones sanes o sense cap patologia de la tiroides.

Una altra limitació ha estat el temps d'impressió del prototip de l'estructura òssia i vascular, degut a la seva geometria i els paràmetres d'impressió triats per obtenir acabats de qualitat. Aquest temps va impedir imprimir-la juntament amb la tiroides, un resultat potser més aproximat al concepte de guia quirúrgica. L'ideal seria poder imprimir l'estructura òssia i vascular d'un color i la tiroides d'un altre. Cal tenir en compte que les impressores només poden usar dos materials i un d'ells ha de ser el material de suport, una limitació general. Això requeriria una planificació d'impressió més extensa i temps addicional treballant els models i el seu assemblatge fent que unes estructures servissin de suport per les altres, això va més enllà dels objectius del projecte.

7.3. Contribucions als objectius de desenvolupament sostenible (ODS) de les Nacions Unides

- **3. Salut i benestar:** aquest treball de fi de grau presenta una eina per a una millor planificació quirúrgica, promou directament la salut i benestar oferint un millor tractament pels pacients.
- **4. Educació de qualitat:** aquests models i guies quirúrgiques poden servir per a la formació d'estudiants i residents, tant per coneixement anatòmic com per planificació.
- **9. Indústria, innovació i infraestructures:** fomenta la innovació tècnica i la tecnologia aplicada a la medicina.
- **12. Producció i consum responsable:** s'ha procurat fer servir només els recursos necessaris, imprimint només les segmentacions de la tiroides. Els materials emprats per a la impressió són biodegradables i respectuosos amb el medi ambient.
- **17. Aliances per a aconseguir objectius:** s'estableixen aliances entre metges i enginyers per a aconseguir millorar la qualitat en tractament i assistència a les persones.

CAPÍTOL 8. CONCLUSIONS

El coll és una regió del cos amb un gran interès, propensa a patologia, però la seva anatomia és complexa i complicada de segmentar. L'obtenció de guies quirúrgiques 3D personalitzades, digitals o físiques, suposa una revolució en la planificació de cirurgies i en millora la qualitat.

En aquest treball de fi de grau s'ha desenvolupat una metodologia estàndard per a l'obtenció de guies quirúrgiques impreses a partir d'un cas real. Se'n destaca sobretot l'obtenció d'una metodologia de segmentació automàtica des de zero, capaç de segmentar l'estructura d'interès, la tiroides, i altres teixits. S'obtenen bons resultats qualitius i quantificats, també en validar-la amb un segon cas, mostrant la capacitat de generalització de la metodologia. Confirmant així la hipòtesi plantejada al capítol 4 i l'assoliment de la totalitat dels objectius proposats. El plantejament inicial era aconseguir automatitzar la segmentació de les estructures anatòmiques més importants del coll. Aquest objectiu es va haver de simplificar en obtenir segmentada la tiroides i altres teixits perquè la disposició de recursos no va permetre enfocar una metodologia que ho aconseguís. Cal destacar que la metodologia es va començar a elaborar sense disposar del GT, i va ser més endavant, quan es va tenir i es va poder millorar a passos molt més ràpids.

Pensant en les possibilitats i futures direccions d'aquest projecte, es podria considerar el present treball com a una primera aproximació a la segmentació automàtica d'estructures anatòmiques de la regió del coll. De la part de segmentació es podria plantejar com a treball futur l'obtenció de més casos amb el seu GT per continuar-la validant i ajustant per millorar-la. La metodologia de segmentació semiautomàtica es podria extrapolar per a aconseguir segmentacions d'altres estructures fent proves i ajustant paràmetres. Estaria bé elaborar una interfície per l'usuari més còmode i pràctica per obtenir els models, amb totes les parts en un sol recurs.

També es podrien explorar les possibilitats dels models 3D digitals per a la simulació de cirurgies i comprensió de l'anatomia, desenvolupar una interfície que permeti encaixar i desencaixar les diferents estructures en un model i dissenyar les eines per simular el procediment quirúrgic.

Amb les segmentacions impreses, com s'ha descrit a la discussió, es podria fer més proves d'impressió de diversos teixits junts i, fins i tot, arribar a elaborar models desmuntables. La possibilitat d'imprimir amb materials més tous que simulessin millor la textura i consistència del teixit humà podria permetre la pràctica de cirurgies prèvies a la cirurgia real i servir per la formació de cirurgians. Això facilitaria l'estudi de la millor ruta i abordament de la cirurgia.

REFERÈNCIES

1. Vigneswaran N, Williams MD. Epidemiologic trends in head and neck cancer and aids in diagnosis. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am* [Internet]. 2014;26(2):123–41. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coms.2014.01.001>
2. Problemas o enfermedades crónicas o de larga evolución en los últimos 12 meses en población adulta según sexo y grupo de edad. Población de 15 y más años [Internet]. INE. [citad el 20 d'agost de 2023]. Disponible a: <https://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?path=/t15/p419/a2011/p01/10/&file=01015.px&L=0>
3. Gulati S, Chumber S, Puri G, Spalkit S, Damle NA, Das CJ. Multi-modality parathyroid imaging: A shifting paradigm. *World J Radiol* [Internet]. 2023;15(3):69–82. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.4329/wjr.v15.i3.69>
4. Chan HHL, Siewerdsen JH, Vescan A, Daly MJ, Prisman E, Irish JC. 3D rapid prototyping for otolaryngology-head and neck surgery: Applications in image-guidance, surgical simulation and patient-specific modeling. *PLoS One* [Internet]. 2015;10(9):e0136370. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0136370>
5. Cruz Peñas A. Análisis de diferentes métodos para segmentar estructuras anatómicas de tejido blando y su posterior impresión mediante fabricación aditiva. [TFG] Universitat de Girona; Juny 2023.
6. Mearelli G. Aplicació de la impressió 3D en estructures anatòmiques. [TFG] Universitat de Girona; Setembre 2018.
7. Roesch ZK, Tadi P. *Anatomy, Head and Neck, Neck*. StatPearls Publishing; 2023.
8. Encyclopædia Britannica, Inc. Thyroid gland [Internet]. Disponible a: <https://www.britannica.com/science/thyroid-gland>
9. Thyroid disease [Internet]. Cleveland Clinic. [citad el 20 d'agost de 2023]. Disponible a: <https://my.clevelandclinic.org/health/diseases/8541-thyroid-disease>
10. Hussain S, Mubeen I, Ullah N, Shah SSUD, Khan BA, Zahoor M, et al. Modern diagnostic imaging technique applications and risk factors in the medical field: A review. *Biomed Res Int* [Internet]. 2022;2022:5164970. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1155/2022/5164970>
11. Components of a Typical Computed Tomography System [Internet]. Disponible a: <https://www.twomeyconsulting.com/learn/computed-tomography>
12. Main components of a CT machine, including gantry, x-ray tube, detector array, and the table for translating the object being studied [Internet]. Disponible a: https://www.researchgate.net/publication/343519170_A_comprehensive_review_of_dual-energy_and_multi-spectral_computed_tomography
13. Tomografía computarizada (TC) [Internet]. National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering. [citad el 20 d'agost de 2023]. Disponible a: <https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/tomograf%C3%ADa-computarizada-tc>
14. A coronal view of a whole-body CT scan image with regions of each body part [Internet]. Disponible a: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-51779-5>
15. Anshik. Medical Imaging. En: *AI for Healthcare with Keras and Tensorflow 20*. Berkeley, CA: Apress; 2021. p. 245–312.
16. CT head neck - sectional-anatomy.org [Internet]. Sectional-anatomy.org. [citad el 20 d'agost de 2023]. Disponible a: <https://sectional-anatomy.org/ct-head-neck/>
17. Image Processing Toolbox — Funcions [Internet]. MathWorks. Disponible a: https://es.mathworks.com/help/images/referencelist.html?type=function&s_tid=CRUX_topnav
18. Huynh N. Understanding evaluation metrics in medical image segmentation [Internet]. MLearning.ai. 2023 [citad el 20 d'agost de 2023]. Disponible a: <https://medium.com/mllearning-ai/understanding-evaluation-metrics-in-medical-image-segmentation-d289a373a3f>
19. Systèmes D. Impresión 3D [Internet]. Dassault Systèmes. 2022 [citad el 20 d'agost de 2023]. Disponible a: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/3d-printing>
20. Oreiller V, Andrearczyk V, Jreige M, Boughdad S, Elhalawani H, Castelli J, et al. Head and neck tumor segmentation in PET/CT: The HECKTOR challenge. *Med Image Anal* [Internet]. 2022;77(102336):102336. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.media.2021.102336>

21. Nikolov S, Blackwell S, Zverovitch A, Mendes R, Livne M, De Fauw J, et al. Clinically applicable segmentation of head and neck anatomy for radiotherapy: Deep Learning algorithm development and validation study. *J Med Internet Res* [Internet]. 2021;23(7):e26151. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.2196/26151>
22. Wasserthal J. TotalSegmentator: Tool for robust segmentation of 104 important anatomical structures in CT images.
23. Lasso A. SlicerTotalSegmentator: Fully automatic total body segmentation in 3D Slicer using "TotalSegmentator" AI model.
24. Wasserthal J. Dataset with segmentations of 104 important anatomical structures in 1204 CT images. Zenodo; 2022.
25. Planificació i impressió 3D [Internet]. Hospital Sant Joan de Déu. [citat el 20 d'agost de 2023]. Disponible a: <https://www.sjdhospitalbarcelona.org/ca/professionals/oferta-serveis-hospitals-professionals/planificacio-impressio-3d>
26. Tejo A, Castellví A, Lustig P, Fenollosa F, Uceda R, Buj I, et al. 3D printed surgical planning prototype manufactured by a hybrid multi-material 3D printer. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* [Internet]. 2021;1193(1):012116. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/1193/1/012116>
27. Nyirjesy SC, Heller M, von Windheim N, Gingras A, Kang SY, Ozer E, et al. The role of computer aided design/computer assisted manufacturing (CAD/CAM) and 3- dimensional printing in head and neck oncologic surgery: A review and future directions. *Oral Oncol* [Internet]. 2022;132(105976):105976. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oraloncology.2022.105976>
28. 3D Slicer image computing platform [Internet]. 3D Slicer. [citat el 20 d'agost de 2023]. Disponible a: <https://www.slicer.org/>
29. MATLAB [Internet]. Mathworks.com. [citat el 20 d'agost de 2023]. Disponible a: <https://es.mathworks.com/products/MATLAB.html>
30. BCN3D Stratos [Internet]. BCN3D Technologies. 2021 [citat el 20 d'agost de 2023]. Disponible a: <https://www.bcn3d.com/ca/bcn3d-stratos/>
31. Sigma R19 - User Manual [Internet]. BCN3D Technologies. 2019 [citat el 20 d'agost de 2023]. Disponible a: <https://www.bcn3d.com/ca/bcn3d-sigma-manual-usuari/>
32. EinScan Pro 2X - Escàner 3D de mano multifuncional de SHINING 3D [Internet]. EinScan. 2018 [citat el 20 d'agost de 2023]. Disponible a: <https://www.einscan.com/escaneres-3d-portatiles/einscan-pro-2x-es/>
33. Geomagic® Essentials™ [Internet]. EinScan. 2019 [citat el 20 d'agost de 2023]. Disponible a: <https://www.einscan.com/einscan-software-es/geomagic-essentials-es/>
34. Solidworks.com. [citat el 20 d'agost de 2023]. Disponible a: <https://www.solidworks.com/>
35. Mansoor A, Bagci U, Foster B, Xu Z, Papadakis GZ, Folio LR, et al. Segmentation and image analysis of abnormal lungs at CT: Current approaches, challenges, and future trends. *Radiographics* [Internet]. 2015;35(4):1056-76. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1148/rg.2015140232>
36. Teng C-C, Shapiro LG, Kalet I. Automatic Segmentation of Neck CT Images. En: 19th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS'06). IEEE; 2006.
37. Pardo XM, Carreira MJ, Mosquera A, Cabello D. A snake for CT image segmentation integrating region and edge information. *Image Vis Comput* [Internet]. 2001;19(7):461-75. Disponible a: [http://dx.doi.org/10.1016/s0262-8856\(00\)00092-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0262-8856(00)00092-5)
38. Fritscher KD, Peroni M, Zaffino P, Spadea MF, Schubert R, Sharp G. Automatic segmentation of head and neck CT images for radiotherapy treatment planning using multiple atlases, statistical appearance models, and geodesic Active Contours: Segmentation of head-neck CT images using MABSInShape. *Med Phys* [Internet]. 2014;41(5):051910. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1118/1.4871623>
39. Adam A (2023). Converting a 3D logical array into an STL surface mesh (<https://www.mathworks.com/MATLABcentral/fileexchange/27733-converting-a-3d-logical-array-into-an-STL-surface-mesh>), MATLAB Central File Exchange. Recuperat July 30, 2023.
40. Brisa A. Practical User Manual to compare bodies. 2023 abr.
41. Brisa A. Practical User Manual to 3D scan bodies. 2023 abr.

ANNEX A. Planificació

El desenvolupament d'aquest projecte s'ha dividit en dues grans etapes, la relacionada el desenvolupament de la metodologia de segmentació i la relacionada amb l'obtenció dels models 3D i la impressió dels prototips. Afegint també la recerca preliminar i la redacció d'aquesta memòria. A l'Esquema 2 podem veure les tasques agrupades per temàtica. Recerca, segmentació, models, impressió, avaluació i redacció.



Esquema 2. Tasques per blocs

A la Taula 15 es recull la descripció de totes les tasques que s'han dut a terme incloent, informació temporal i ús de recursos (persones que han format part de l'equip, infraestructures, serveis i equipaments necessaris).

Tasca	Descripció	Duració	Hores	Recursos
Recerca inicial	Coneixement del projecte CUSTOMED, recerca sobre estat de l'art en segmentació i guies quirúrgiques, recerca sobre l'estructura anatòmica i patologia del coll	15/01-15/02	40h	En totes les tasques es requereix un ordinador. Llicència universitària per accedir a publicacions.
Plantejament de la proposta	Reunions pel plantejament dels objectius i abast del treball.	06/02-15/02	7h	Col·laboració dels tutors del projecte.
DESENVOLUPAMENT DE LA METODOLOGIA DE SEGMENTACIÓ				
Anàlisi de programari	Escollir l'entorn on es desenvoluparia la segmentació i el visualitzador DICOM.	15/02-06/03	30h	Imatges Programari: MATLAB i 3D Slicer. Col·laboració del tutor del projecte de la part d'imatge mèdica: Anton Bardera
Anàlisi i visualització de les dades	Anàlisi de les imatges i els casos proporcionats pel metge, estructuració de la informació. Visualització i anàlisi més detallat de les característiques de la imatge que es va fer servir. Quan es va disposar del GT, es van analitzar conjuntament.	01/03-20/03	40h	

Recerca en metodologies de segmentació	Recerca en metodologies de segmentació automàtica i eines existents. Coneixement de l'estat de l'art en segmentació de la zona i estudis realitzats. Recerca de més imatges en bases de dades.	15/02-20/03	60h	
Primeres proves de segmentació *	Proves i aproximacions amb diferents algorismes de segmentació tradicionals: aplicació de llindars, <i>Region Growing...</i> També d'algorismes d'intel·ligència artificial com K-means.	13/03-17/04	75h	
Lectura de les imatges en MATLAB i desenvolupament de la metodologia automàtica *	Comprensió del format DICOM i proves i cerca de la millor manera d'obrir la imatge en MATLAB per treballar-hi. Desenvolupament de la metodologia automàtica valorant qualitativament els resultats i basant-nos en prova i error. També a partir de la mètrica d'avaluació DICE.	17/04-08/05	70h	
Desenvolupament de la metodologia de segmentació semiautomàtica	Desenvolupament de la metodologia semiautomàtica valorant qualitativament els resultats i basant-nos en prova i error. També a partir del DICE.	08/05-05/06	40h	
Obtenció de les segmentacions en format STL	Buscar la millor manera d'obtenir la segmentació en el format desitjat. Entendre el codi triat i adaptar-lo.	01/06-15/06	25h	
PROCESSAMENT DELS MODELS 3D I IMPRESSIÓ DE PROTOTIPS				
Visualització i processament dels models	Visualització dels models obtinguts a partir de les segmentacions i suavitzat en 3D Slicer.	15/06-22/06	10h	3D Slicer.
Preparació dels arxius d'impressió	Preparació dels paràmetres i suports dels arxius per a la impressió dels models.	04/07-07/07	3h	Software d'impressió 3D impressora 3D i material.
Impressió dels prototips	Impressió dels prototips.	07/07-25/07	20h	Software d'escaneig i escàner. (Recursos del GREP)
Escaneig dels prototips impresos	Escaneig i processament dels prototips impresos per tenir-los digitals en format STL.	25/07-27/07	3h	Col·laboració:
Avaluació comparativa amb SolidWorks	Avaluació comparativa en mm de les diferències entre els prototips, els models 3D en referència al GT.	28/07-31/07	5h	Maria Luisa Garcia, tutora del projecte. Àngel Brisa, enginyer industrial i becari del grup de recerca GREP en la impressió, escaneig i ús dels SolidWorks. Ús dels manuals desenvolupats per ell mateix.
ALTRES				
Validació de la metodologia de segmentació amb un segon cas	Validació de la metodologia de segmentació amb un segon cas avaluant el DICE i els models en 3D respecte el GT.	19/06-04/07	4h	Imatges, MATLAB i 3D Slicer
Versió final dels codis	Preparar versió final dels codis: afegir comentaris, millorar els noms de les variables per fer-lo més comprensiu, treure les figures i visualitzacions que es van fer servir per desenvolupar i anar avaluant la	10/06-15/06	8h	

	metodologia, afegir missatges en el cas de la metodologia interactiva...			
Redacció de la memòria	Redacció del projecte i totes les seves etapes en la present memòria. Conceptes previs apresos i necessaris, recerca feta sobre l'estat de l'art, presentació de la metodologia seguida i resultats obtinguts.	15/07-04/09	100h	Col·laboració dels tutors del projecte.

Taula 15. Planificació per tasques

El total d'hores dedicades al projecte són aproximadament: 480 hores.

* Cal destacar que sense el GT no es va poder desenvolupar amb èxit la metodologia de segmentació. Abans de l'obtenció del GT del primer cas (mitjans d'abril) va ser difícil desenvolupar la metodologia de segmentació perquè no es podia quantificar la qualitat de les decisions.

Durant varies etapes del desenvolupament del treball el Dr. Gironès ha estat acompanyant la realització del projecte. Ens ha assessorat i donat suport. Des d'informació clínica dels casos i de la realització de les cirurgies de la zona fins a informació i material sobre l'anatomia. També ha resolt dubtes durant el procés i les seves indicacions i experiència han sigut motiu de moltes de les decisions preses al llarg del projecte. La seva cooperació i experiència han aportat un valor incalculable al treball i als bons resultats obtinguts.

Com a resum, es presenta a l'Esquema 3 el diagrama de Gantt del desenvolupament del projecte.



Esquema 3. Diagrama de Gantt

ANNEX B. Codi

El codi desenvolupat per a la segmentació de les imatges radiològiques es pot consultar al repositori Github: https://github.com/camilasilvadelgado/TFG_Part-segmentacio

Delgado CS. TFG_Part-segmentacio: Codi desenvolupat al TFG: Segmentació automàtica d'imatges radiològiques per la posterior fabricació de guies quirúrgiques per la planificació de cirurgies de la zona cap-coll.

Al README s'especifiquen els requeriments d'instal·lació per a fer servir el codi entre d'altra informació d'interès.

El repositori té la següent estructura. Dues carpetes:

- **Codi per aconseguir les segmentacions, per l'usuari.** Inclou el codi necessari per obtenir les segmentacions (dos codis amb les dues metodologies de segmentació i els arxius necessaris a tenir al directori per passar les segmentacions a STL). S'adjunta també un arxiu en format PDF on s'explica el manual per l'usuari per aconseguir les segmentacions, aquest manual és la primera part de l'ANNEX F. Guia per l'usuari, del treball.
- **Codi anàlisi i avaluació.** Hi ha el codi desenvolupat per l'anàlisi de la imatge i el GT, la prova de segmentació amb K-means i el codi fet servir per a l'avaluació i el càlcul del coeficient DICE.

ANNEX C. Pressupost

Al següent annex es presenta un pressupost aproximat per determinar el cost econòmic de l'objecte del TFG. Inclou costos materials, despeses generals, impostos i altres conceptes que influeixen en el cost final de la realització del TFG. A la Taula 16 podem veure, fent aproximacions, el pressupost amb els preus unitaris, els pressupostos parcials i el pressupost total.

Concepte	Descripció	Quantitat	Preu	Cost
Mà d'obra	Enginyer biomèdic	380 h	25 €/h	9.500 €
Mà d'obra	Metge consultor	15 h	80 €/h	1.200 €
Recurs digital	3D Slicer	1	0 €	0 €
Recurs digital	Llicència MATLAB estàndard	1 any	860 €	860 €
Recurs digital	Llicència SolidWorks estàndard	1 any	3480 €	3.480 €
Recurs físic	Ordinador MacBook Pro 2022	1	1700 €	1.700 €
Recurs físic i digital	Impressora 3D i software 'slicing'	1	3000 €	3.000 €
Recurs físic i digital	Escàner i software d'escaneig	1	4099 €	4.099 €
Recurs físic	Material d'impressió PLA	150 g	0,035 €/g	5,25 €
Recurs físic	Material d'impressió PVA	45 g	0,112 €/g	5,04 €
			Suma	23.849 €
			% Impostos	21 %
			Impostos	5.008 €
			Total	28.858 €

Taula 16. Pressupost

Amb relació als preus establerts per la mà d'obra, s'ha fet recerca i s'ha definit una mitjana de sou per hora per definir el preu. S'ha decidit definir el perfil principal en la mà d'obra com a enginyer biomèdic però es podria desglossar en enginyer informàtic o programador i enginyer industrial. El preu definit s'estableix com la mitja trobada entre les diferents xifres i rangs trobats segons experiència del cost d'un enginyer biomèdic, un enginyer informàtic i un enginyer industrial.

Amb relació a les llicències, s'ha buscat el preu per un any perquè s'ofereix aquesta opció, s'ha de tenir en compte que aquests les llicències per estudiants o per la universitat no tenen aquest cost. Els recursos emprats com la impressora, material i escàner, són recursos del grup de recerca GREP. Es tenen en compte els preus totals dels recursos com l'escàner, la impressora i l'ordinador tot i que aquests recursos s'amortitzin en altres projectes i usos. Podria haver-hi altres conceptes a tenir en compte com infraestructures, internet, transport, però finalment s'han considerat només aquells més significatius.

ANNEX D. Comitè d'Ètica

Com s'ha descrit a l'apartat de materials, a aquest treball es treballen amb dades mèdiques i per tant, s'ha de respectar la protecció de dades, per això les imatges estaven anonimitzades i els pacients van firmar un consentiment per utilitzar les seves imatges en aquest projecte, van ser informats del projecte, la seva finalitat i del tractament que rebrien les seves imatges. S'adjunta el document, Figura 31, que signen els pacients donant consentiment perquè les proves del pacient formin part de la documentació mèdica de l'institut d'Assistència Sanitària

S/  **Hospital Universitari de Girona
Doctor Josep Trueta**

**Hospital Universitari de Girona
Doctor Josep Trueta**
Ctra. de França, s/n - 17007 (Girona)
T.972-940-200 icsgirona.cat
arxius.girona.ics@gencat.cat

FULL AUTORITZACIÓ

Jo,

amb número DNI/NIE/passaport

autoritzo a el/la senyor/a

amb número DNI/NIE/passaport

per tal que actuï en el meu nom per poder fer les gestions pertinents a la Unitat de Documentació Mèdica de l'Institut d'Assistència Sanitària.

Signat: Signatura persona autoritzada:

Lloc i Data:

DOCUMENTS A ADJUNTAR:

DNI TITULAR

DNI PERSONA AUTORITZADA

 **Generalitat de Catalunya
Departament de Salut**

Figura 31. Consentiment informat

ANNEX E. Informació sobre els casos clínics

El metge del cas va proporcionar dos documents amb informació sobre els casos clínics i l'informe de la prova radiològica. Aquests informes han servit per entendre millor les proves i per situar-nos en la patologia.

Cas 1: Goll compressiu

Dona de 60 anys que acudeix a consultes per quadre clínic compressiu a nivell cervical, amb tos, molèsties al tragar i ocasionalment refereix disfonia. Refereix que coneixia presència de Goll Multinodular des del 2013 controlat pel seu CAP. I al últim any ha aparegut la clínica compressiva.

Exploratoriament destaca palpació de massa a cara anterior de la regió cervical compatible amb goll.

ANTECEDENTS PERSONALS

- No al·lèrgies medicamentoses conegudes
- Nega hàbits tòxics
- No irradiació en la infància

ANTECEDENTS FAMILIARS

- Sense interès

ANTECEDENTS PATOLÒGICS

- Sense interès

ANTECEDENTS QUIRÚRGICS: Apendicectomia, hernia hiat, hemorroides...

MEDICACIÓ HABITUAL: no refereix

TC de CAP i COLL:

Estabilitat en les mides del **goll** multinodular principalment a **expenses del LTD**. Les mides aproximades són: LTD: 46x28x76 mm; LTI: 29x19x63 mm; istme 12 mm. **No hi ha canvis en la lleu estenosi traqueal secundària (<50%)**. L'efecte de massa del LTD condiciona una **estenosi de la unió entre la vena jugular interna dreta i la vena subclàvia** (tall 59/253). Persisteix l'estenosi del tronc venós braquiocefàlic esquerre entre la 1a unió costoclavicular i el tronc arterial braquiocefàlic (tall 44/253) que condiciona un reflux cap a les venes jugulars (potser podria ser posicional durant el decúbit). Estructures de la base del crani, càvum, estructures faríngies i laríngies sense alteracions patològiques rellevants. Glàndules parotídies i submaxil·lars sense troballes significatives. No s'identifiquen adenopaties laterocervicals de mida ni característiques sospitoses. Via aèria lliure

Cas 2: Goll gegant cervical endotoràcic

Dona 78 anys amb Goll Multinodular bilateral de predomini dret (més de 20 cms de diàmetre màxim. Canto esquerra mínimament endotoràcic. Tràquea comprimida a la meitat aproximadament. Consulta per clínica opressiva a nivell de regió cervical.

Antecedents patològics:

- Goll conegut des de fa 20 anys.
- Hipertensió arterial
- Diabetes

INFORME CAP i COLL: Estructures de la base del crani, càvum, estructures faríngies i laríngies sense alteracions patològiques rellevants. Gran goll tiroïdal amb LTD de 8x6.3x117 cm, istme de 4.5 cm i LTE de 6.6x7x12 cm. El lòbul tiroïdal esquerre presenta una lleu extensió endotoràcica. El parènquima tiroïdal és heterogeni amb algunes calcificacions. Glàndules parotídies i submaxil·lars sense troballes significatives. No s'identifiquen adenopaties laterocervicals de mida ni característiques sospitoses. Via aèria lliure amb mínima reducció del calibre de la tràquea. Correcta pneumatització dels sins paranasals i cel·les mastoïdals.

ANNEX F. Guia per l'usuari

En el següent annex es presenta la guia per l'usuari per a obtenir els prototips de guies quirúrgiques pas a pas per al personal sanitari, explicativa i visual. Aquest procediment és ideal en casos on l'estructura d'interès és la tiroides i els TACS han estat obtinguts amb la mateixa màquina que els casos esmentats durant el projecte.

Requeriments de programari:

- MATLAB amb *Image processing Toolbox, Medical Imaging Toolbox*.
- 3D Slicer
- Software d'slicing' (BCN 3D Stratos)
- Impressora 3D

Entrada:

- Una carpeta/directori amb un TAC en format DICOM. Per exemple, si el TAC té 253 llesques el directori contindrà 253 fitxer .dcm. Es pot veure un exemple a la Figura 32 .

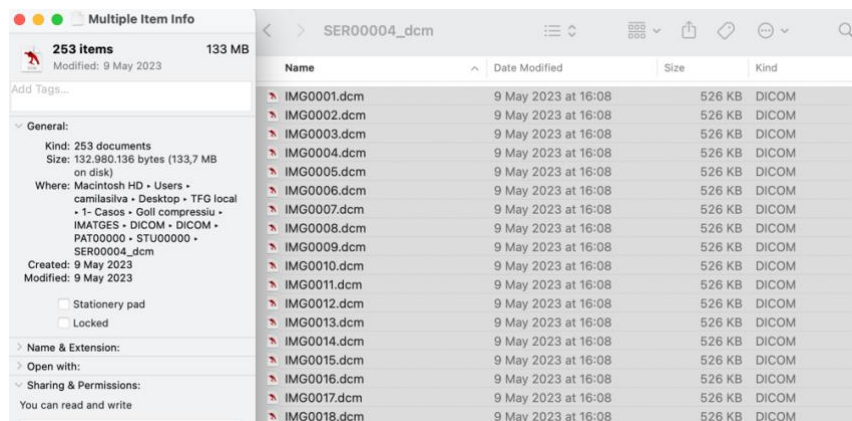


Figura 32. Carpeta amb el TAC

Arxius:

- Per a realitzar la segmentació i obtenir els models 3D es faran servir els arxius del repositori. La carpeta anomenada **Codi per aconseguir les segmentacions**, Figura 33. Aquesta carpeta conté l'arxiu per a la **segmentació automàtica**, l'arxiu per a la **segmentació semiautomàtica** i dins una carpeta (**Arxius per fer la conversió a STL - Aitkenhead AH. Converting a 3D Logical Array into an STL Surface Mesh. 2010.**) els dos arxius necessaris per fer la conversió de volum MATLAB a format STL, Figura 34.

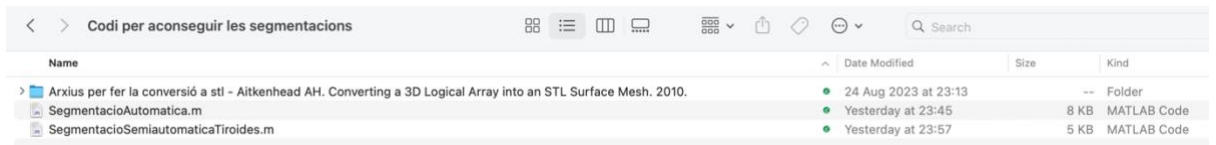


Figura 33. Estructura carpeta amb arxius per l'usuari

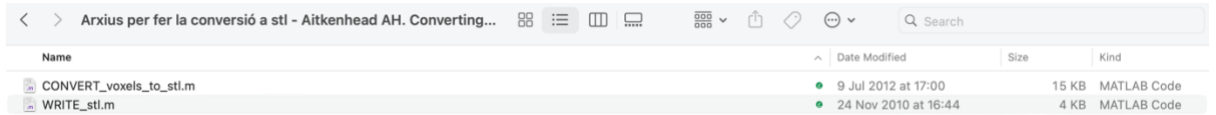


Figura 34. Estructura carpeta amb arxius per la conversió STL

Primer pas:

Posar tots els arxius de la carpeta **Codi per aconseguir les segmentacions**, inclosos els arxius per a la conversió STL, en la carpeta del MATLAB (creada amb la instal·lació del programa) o en una carpeta qualsevol des de la qual MATLAB executi. El que és important és que els arxius es trobin en una carpeta des de la qual es puguin executar en MATLAB. En aquest mateix directori és on es desaran les segmentacions en STL.

Segon pas:

Obrir amb MATLAB els dos arxius de segmentació i canviar el directori indicat a la Figura 35 marcat amb blau, amb el directori on es trobi el TAC desat al seu ordinador. **Nota:** hi ha dos codis de segmentació, `segmentacióAutomàtica.m` i `segmentacióSemiautomàtica.m`, cal canviar el directori als dos si els volen fer servir tots dos.

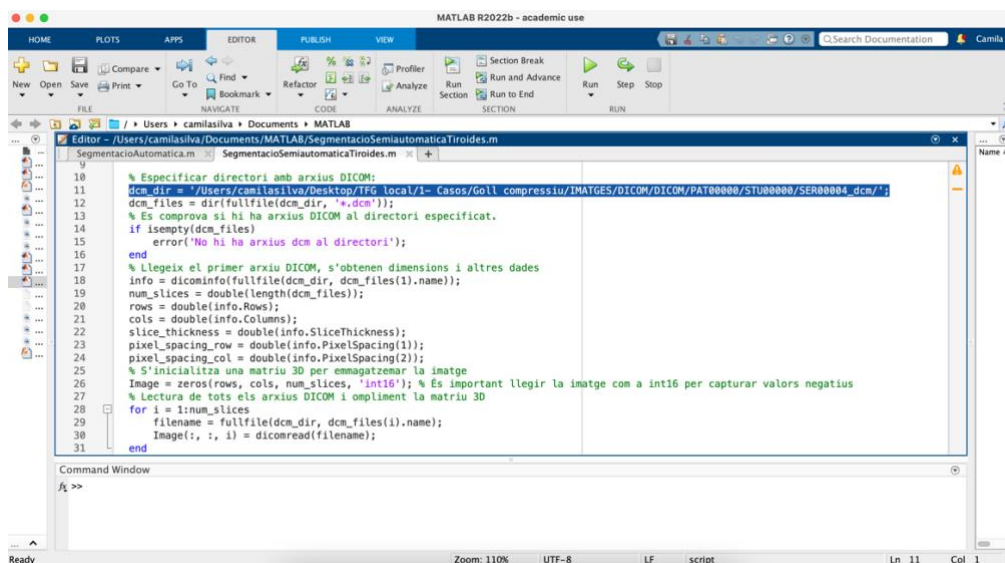


Figura 35. Entorn MATLAB amb directori del TAC marcat

Tercer pas:

S'executarà el codi de la segmentació que es vulgui realitzar (automàtica, semiautomàtica o ambdues). A la finestra 'EDITOR', s'executarà el codi prement 'Run', com es pot veure indicat a la part superior central de la Figura 36.

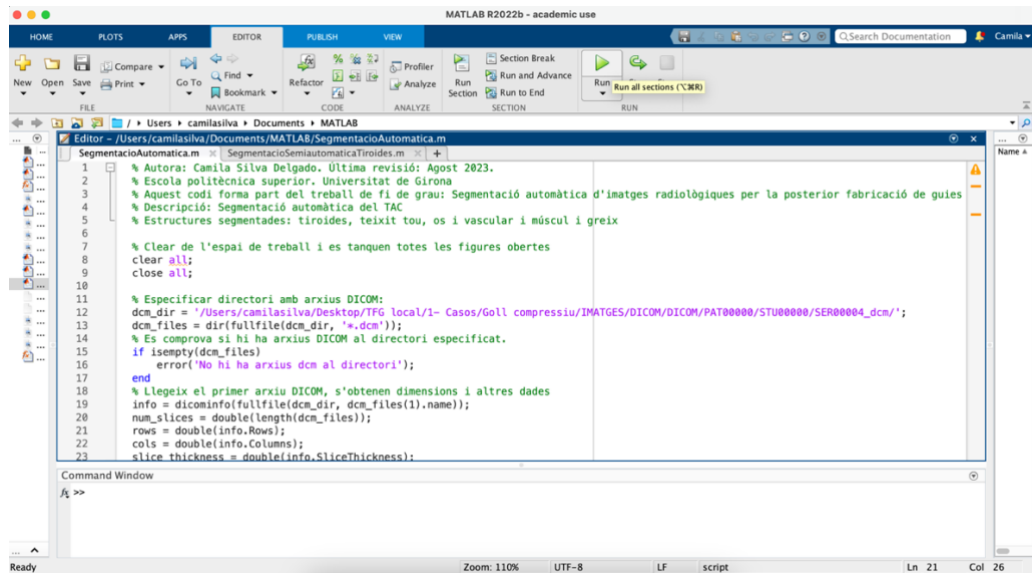


Figura 36. Execució del codi

Segmentació automàtica: en aquest cas només cal prémer 'Run'.

Segmentació semiautomàtica: en aquest cas, després del 'Run', caldrà seguir les instruccions que apareixen a la 'Command Window' per obtenir la segmentació.

- Primer de tot apareix el TAC per visualitzar (Figura 37).

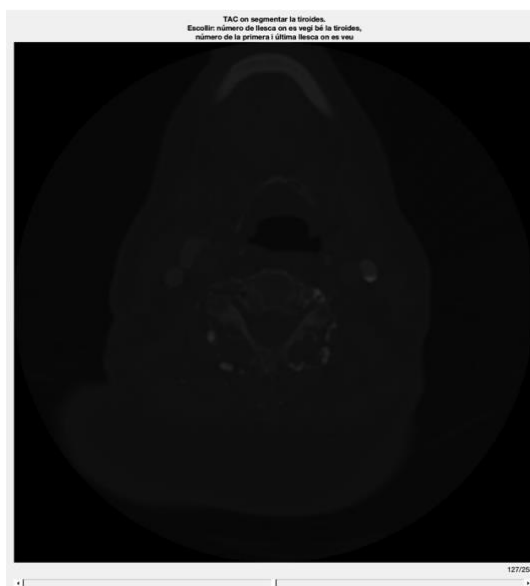


Figura 37. TAC per visualitzar

- Prement i movent el cursor per la imatge d'esquerra a dreta i d'adalt a baix s'ajusta el contrast de la imatge per visualitzar millor les estructures. També es pot moure la barra de la part inferior per navegar per les llesques, com es pot veure a la Figura 38.



Figura 38. TAC amb visualització ajustada

- Cal seguir les instruccions de la 'Command Window' (part inferior de la pantalla) i introduir per teclat els paràmetres que demana (enter per introduir el següent paràmetre) com es pot veure a la Figura 39.

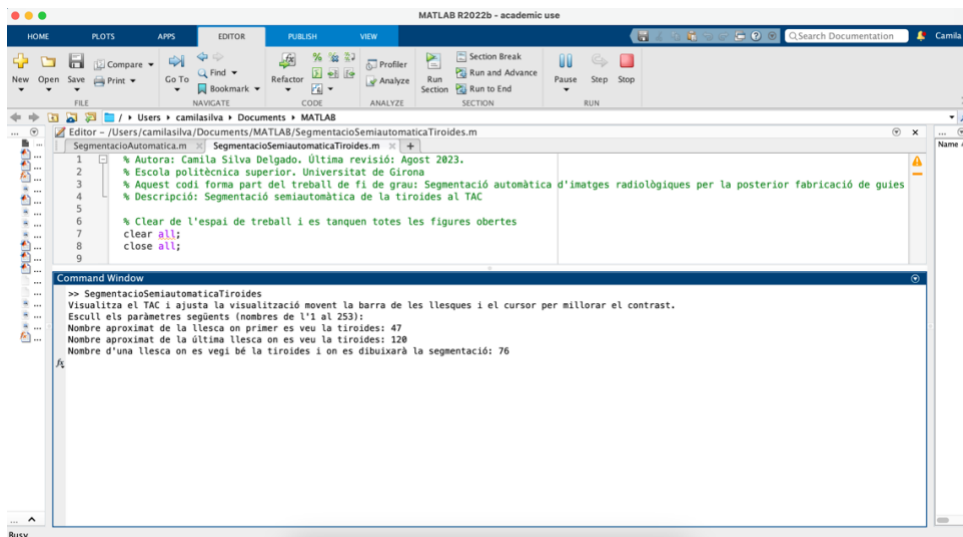


Figura 39. 'Command Window' amb paràmetres a introduir

Apareixen els missatges: *Visualitza el TAC i ajusta la visualització movent la barra de les llesques i el cursor per millorar el contrast.*

Escull els paràmetres següents (nombres de l'1 al 253):

Nombre aproximat de la llesca on primer es veu la tiroides:

Nombre aproximat de la última llesca on es veu la tiroides:

Nombre d'una llesca on es veu bé la tiroides i on es dibuixarà la segmentació:

A continuació apareix la pantalla amb la llesca de la tiroides triada, cal seguir la instrucció que surt de títol a la imatge (Dibuixa la silueta de la tiroides, en acabar, prémer la tecla enter) com es pot veure a la Figura 40 i dibuixar la segmentació de la tiroides prement el cursor. A la Figura 41 podem veure un exemple de segmentació.



Figura 40. Llesca on segmentar la tiroides

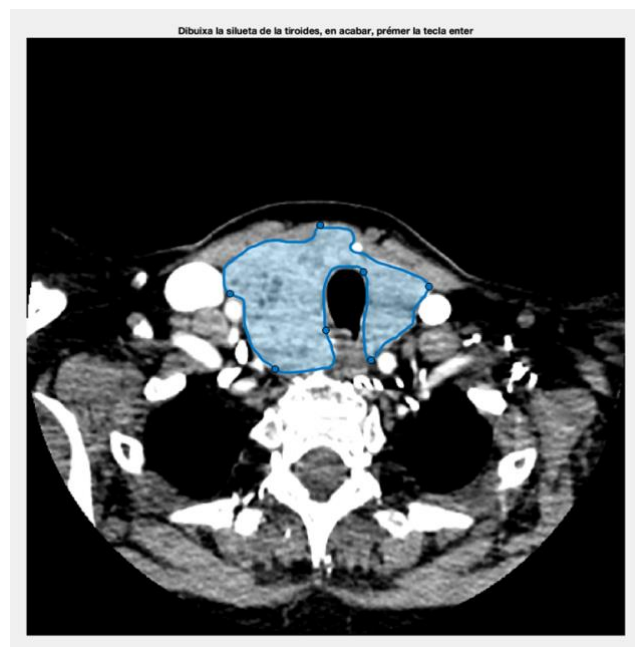


Figura 41. Exemple de segmentació de la tiroides

Quart pas:

Ara ja tenim les segmentacions fetes i el metge pot visualitzar-les i validar-les. Als dos codis apareix un missatge final que indica:

Les segmentacions en format STL han estat desades al directori des d'on ha estat executat aquest codi

Al directori des d'on s'havia executat el codi hi apareixeran les segmentacions en format STL (es pot veure el directori sobre del codi, sota la barra d'accions), per exemple a la Figura 39.

Els noms dels arxius son:

- Segmentació automàtica: *tiroides_automàtica.stl*, *os_vascular_automatca.stl*, *os_vascular_automatca_tallat.stl*, *ttou_automatca.stl*, *múscul_greix_automatca.stl*
- Segmentació semiautomàtica: *tiroides_semiautomàtica.stl*

Cinquè pas:

Obrir les segmentacions amb 3D Slicer i suavitzar-les. Es pot obrir també el TAC per a valorar la qualitat de la segmentació i validar-la.

- Un cop obert 3D Slicer, a la pantalla de benvinguda. Prémer 'Add DICOM Data' si es vol obrir el TAC per visualitzar-lo, en vermell a la Figura 42.

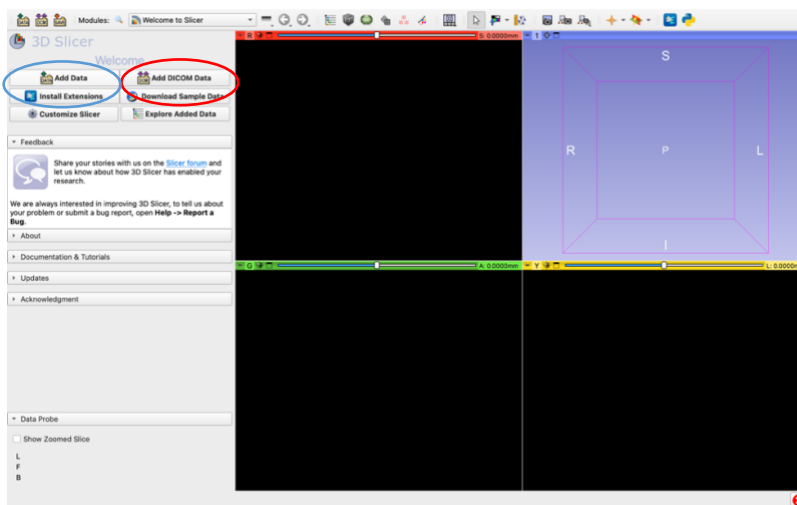


Figura 42. 3D Slicer, pantalla d'inici

- Apareixen les dues opcions que es mostren a la Figura 43. 'Import DICOM files' per importar dades i 'Show DICOM database' per veure els arxius DICOM carregats. Seleccionar 'Import DICOM files' i seleccionar el directori on es troba el TAC, el mateix que s'havia especificat en MATLAB, després 'Import' com s'indica a la Figura 44.

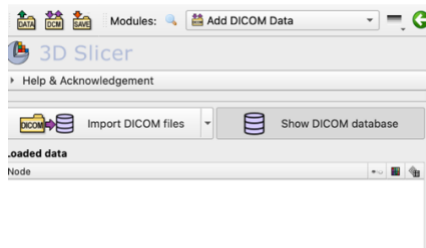


Figura 43. Opcions DICOM database

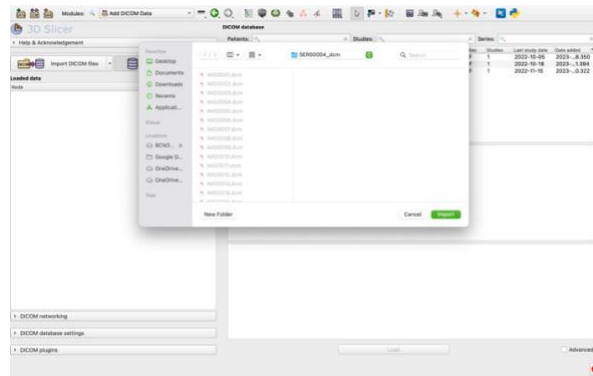


Figura 44. Directori per obrir el TAC

- Per obrir els models, prémer 'Add Data', en blau a la Figura 42. S'obrirà la pantalla de la Figura 45, cal prémer 'Choose Directory to Add'.



Figura 45. Pantalla per afegir dades

- Seleccionar els arxius STL de la carpeta on s'havien creat al **Quart pas**. Apareixeran a la pantalla com a la Figura 46. Cal seleccionar a 'Description' la opció 'Segmentation' per tots els fitxers. Un cop fet això, prémer 'OK'

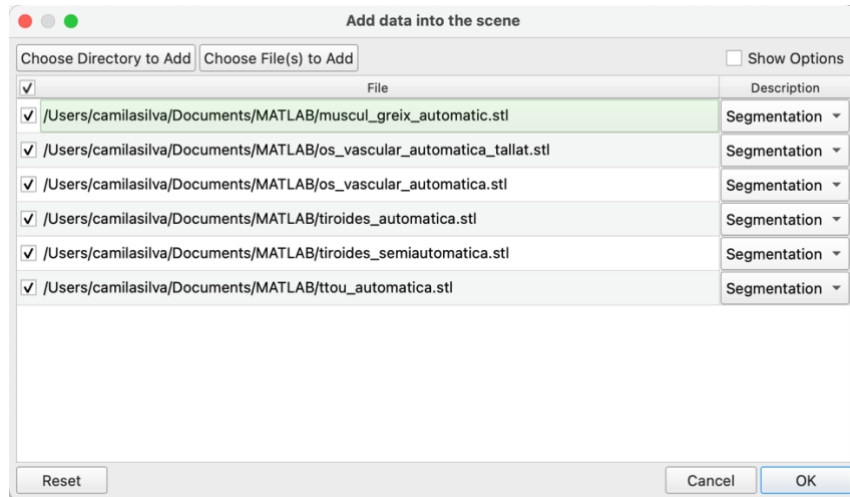



Figura 46. Models importats en 3D Slicer com a segmentacions

- La pantalla d'inici es veurà com a la Figura 47. A l'esquerra les dades que hem carregat i a la dreta, en tres pantalles les 3 vistes del TAC i amb blau de fons, el visualitzador dels models 3D. Es pot ampliar qualsevol de les pantalles si es vol visualitzar millor. Prement la icona: , a la part superior de cada pantalla individual.

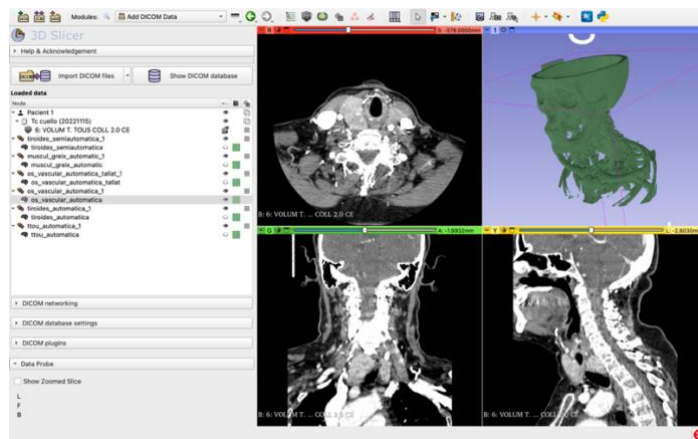


Figura 47. Visualització amb les dades carregades

El metge pot veure les segmentacions i valorar-ne la seva precisió i si son viables i serveixen d'ajuda per a la planificació de la cirurgia.

Sisè pas:

A continuació, s'ensenya com suavitzar els models:

- A la barra amb els diferents mòduls a la part superior de la pantalla, seleccionar el mòdul 'Segment Editor', Figura 48.

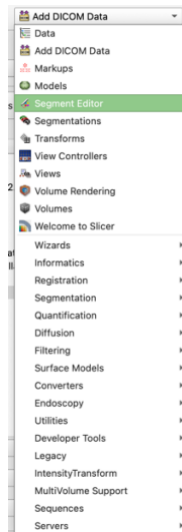


Figura 48. Mòduls

- Un cop al mòdul, seleccionar la 'Segmentation' que volem suavitzar entre el desplegable que apareix, el 'Source Volume' (el TAC). Seleccionar l'eina 'Smoothing' de les opcions la part esquerra de la pantalla i després 'Apply'. Es pot veure a la Figura 49. Sortirà un missatge que informa que la segmentació es transformarà en binària, prémer 'Yes'. Després d'això la segmentació quedarà suavitzada, es pot veure a la pantalla de visualització de volums.

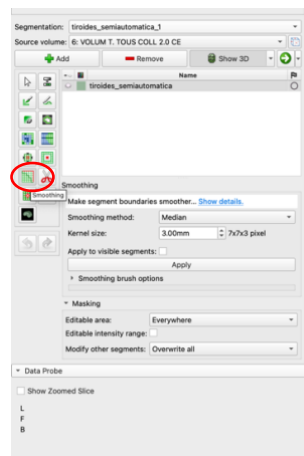


Figura 49. Segment editor, marcada la eina 'Smoothing'

Setè pas:

El següent pas és exportar en STL els models 3D amb les segmentacions suavitzades.

- A la barra d'opcions, triar la opció 'Data' que permet visualitzar totes les dades que tenim, Figura 50.

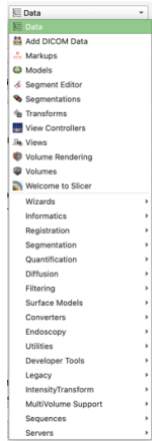


Figura 50. Barra d'opcions

- A continuació, de la segmentació que volem exportar, fer-ne un model. Seleccionant la segmentació amb el botó dret, escollir la opció 'Export visible segments to model', com es pot veure a la Figura 51.

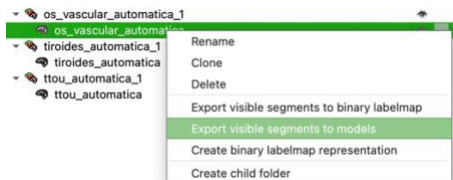


Figura 51. Conversió del segment a model

- A sota totes les dades, s'haurà afegit un nou volum. Seleccionar-lo amb el botó dret i seleccionar 'Export to file...' com a la Figura 52.

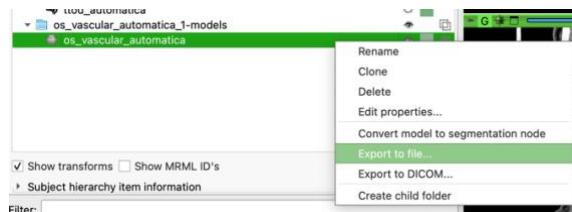


Figura 52. Exportar model a arxiu

- Cal triar el nom amb el qual el guardarem, el directori i el format: STL. Com a la Figura 53. Llavors tindrem el model suavitzat en STL desat al directori especificat.

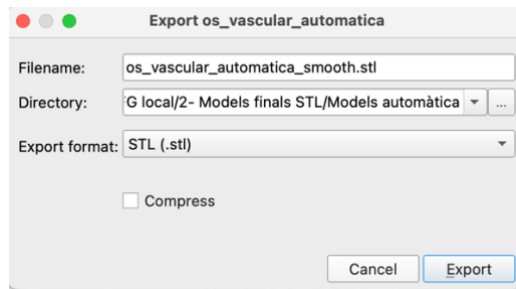


Figura 53. Exportar el model a STL

Vuitè pas:

- Obrir el software per a la impressió 3D (BCN 3D STRATOS) i des del directori on s'han desat els models suavitzats, arrossegar el fitxer STL a la pantalla principal.
- Definir els paràmetres d'impressió com a la Figura 54, Figura 55, Figura 56 (s'afegeixen els suports).
- Visualitzar els suports per veure que la peça quedi assegurada. Prémer 'Slice', a la part inferior dreta de la pantalla. Posteriorment sortirà el temps d'impressió allà mateix i l'opció de 'Save to File', desar-lo a la targeta SD, es pot veure a la Figura 57.

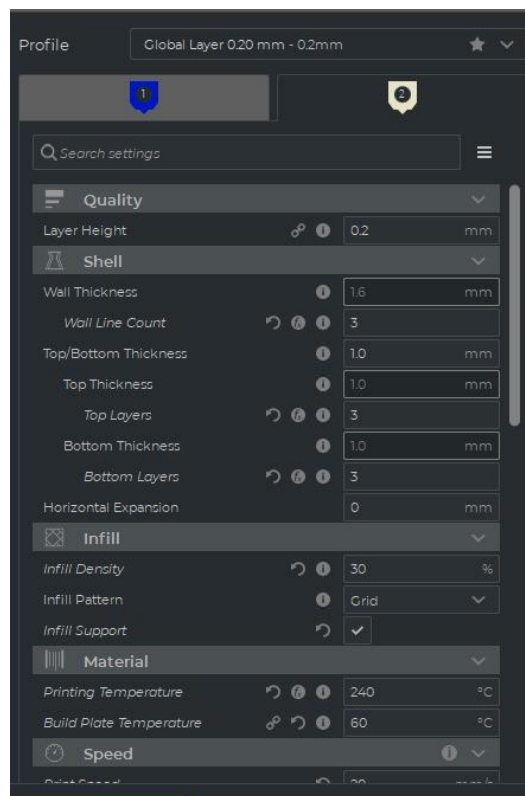


Figura 54. Paràmetres d'impressió

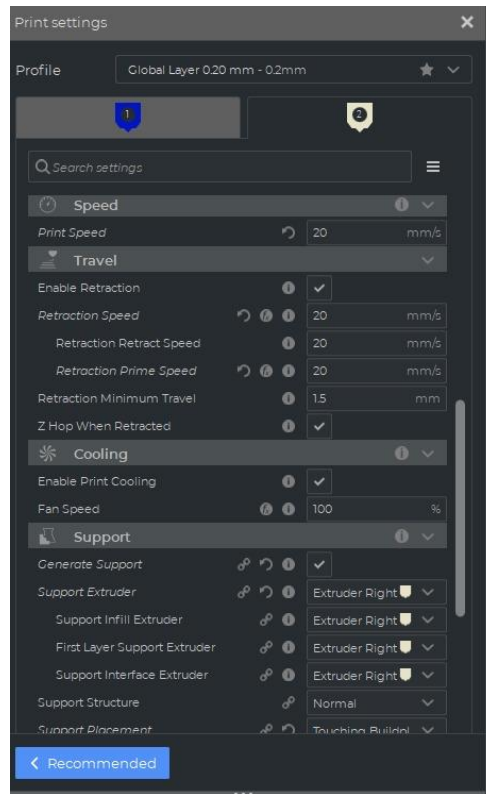


Figura 55. Paràmetres d'impressió

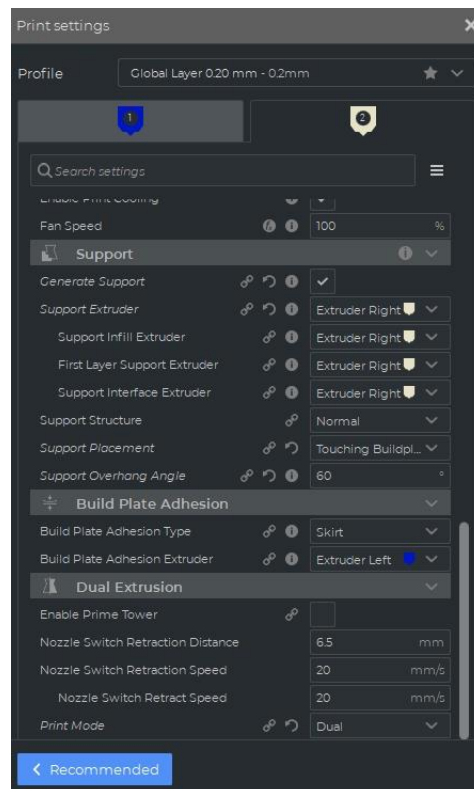


Figura 56. Paràmetres d'impressió

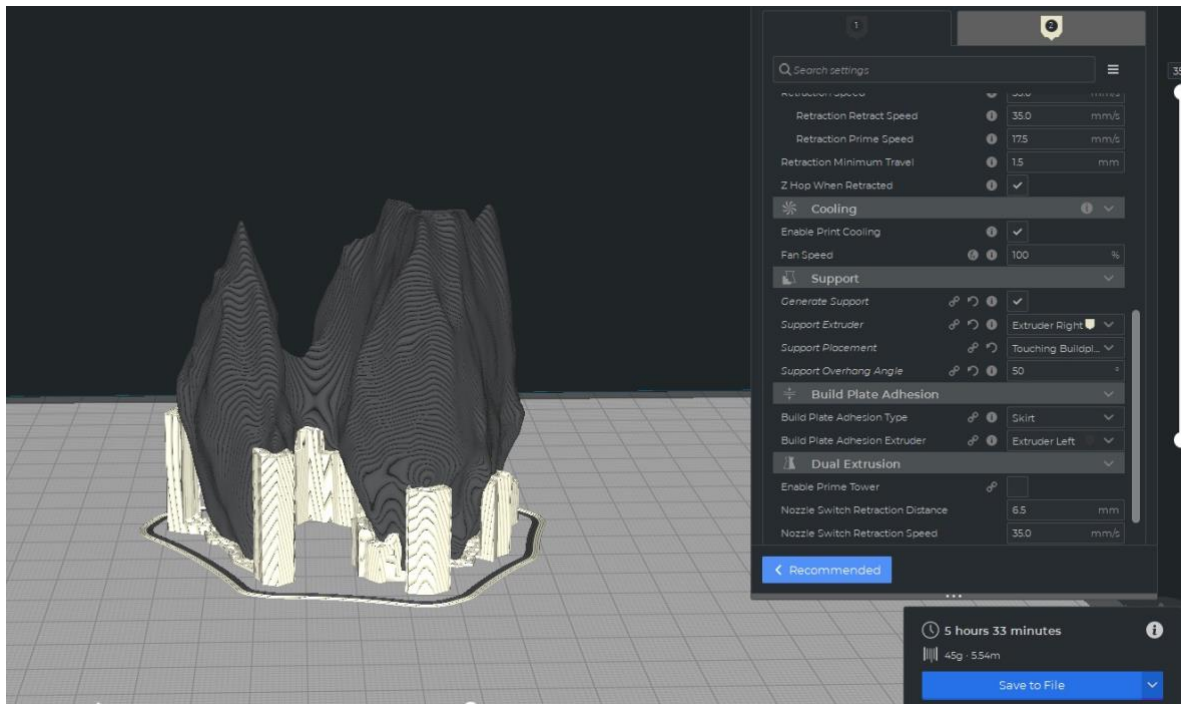


Figura 57. Fitxer apunt per ser desat

Novè pas:

Posar la targeta SD amb l'arxiu d'impressió a la impressora 3D i seguir els passos de la impressora per a imprimir, seleccionar l'arxiu a imprimir i prémer 'Print', Cal posar laca a la plataforma d'impressió per assegurar-ne l'adherència. Després cal esperar a que acabi el temps d'impressió, podem veure-ho a la Figura 58.

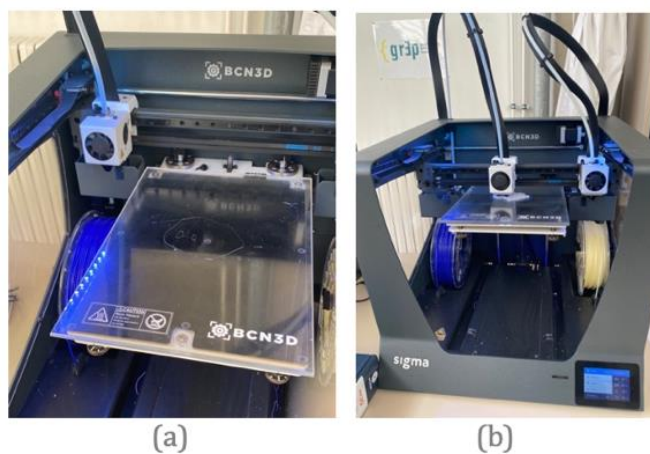


Figura 58. (a) plataforma d'impressió de la impressora. (b) impressora durant la impressió

Un cop passat el temps d'impressió, retirem la peça impresa de la plataforma d'impressió. Un cop impresa la peça, s'ha de posar en remull en aigua perquè es dissolgui el material de suport. Es pot veure l'abans i el després a la Figura 59.

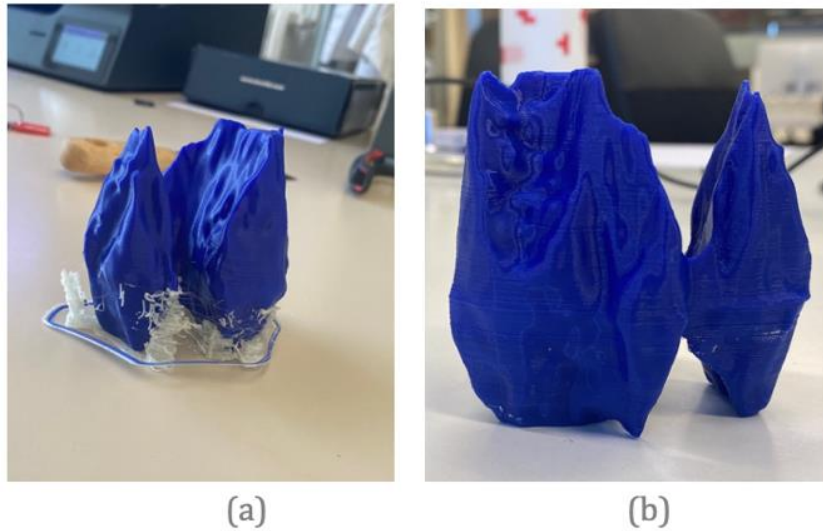


Figura 59. (a) peça impresa amb suports. (b) peça impresa sense suports

ANNEX G. Prova 'TotalSegmentator'

El següent annex presenta la prova realitzada amb l'eina de segmentació TotalSegmentator amb el TAC del cas 1. A la Figura 60. Mòdul 'TotalSegmentator' podem veure el mòdul Total Segmentator a 3D Slicer.

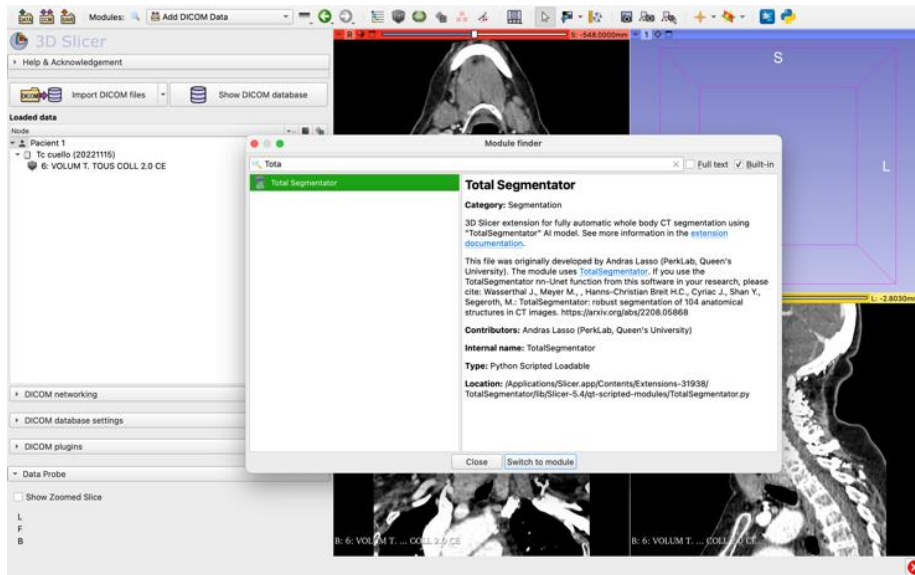


Figura 60. Mòdul 'TotalSegmentator'

Després d'aplicar la segmentació al TAC del cas 1 (Figura 61). Es pot veure com segmenta amb èxit les estructures llistades a la Figura 62 de manera bastant precisa i diferenciant moltes estructures i les diferents parts de cada estructura com per exemple de les costelles.

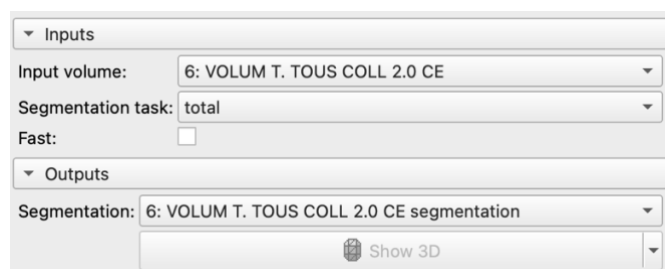


Figura 61. Aplicació de la segmentació



Figura 62. Estructures segmentades

A la Figura 63 podem veure la segmentació que fa el Total Segmentador a una de les llesques d'interès en el nostre projecte. A la Figura 64 podem veure la reconstrucció 3D de les segmentacions. Podem veure com just a la zona del coll les estructures de teixit tou queden sense segmentar, en canvi les vèrtebres les segmenta a la perfecció.

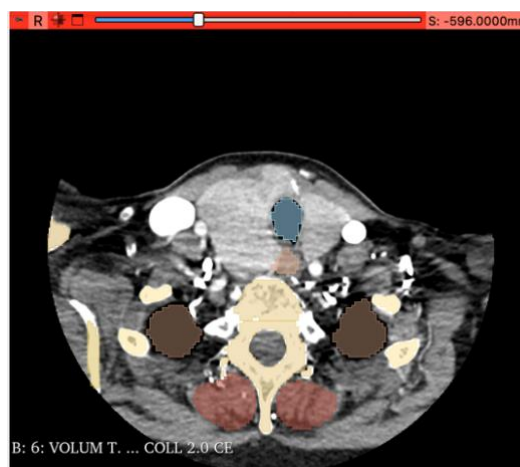


Figura 63. Llesca d'interès amb la segmentació

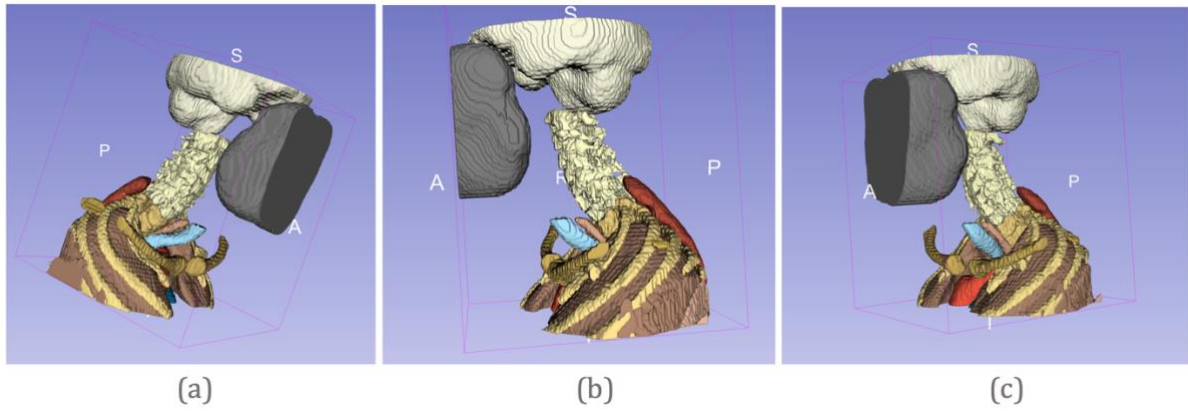


Figura 64. Reconstrucció 3D de la segmentació