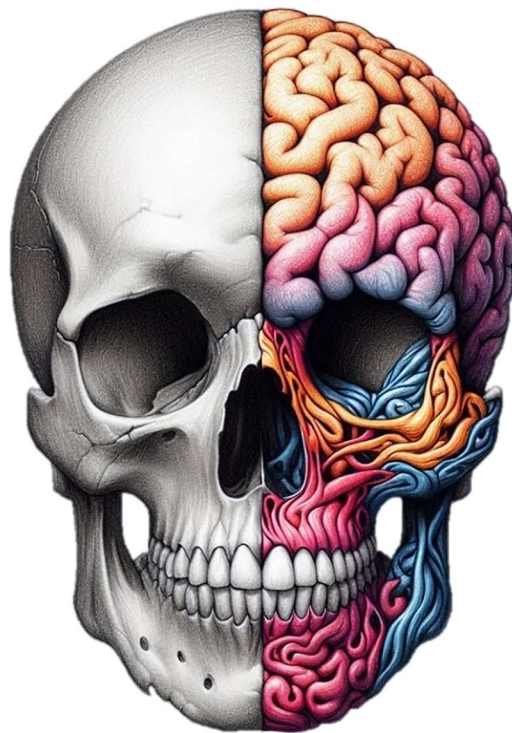


Lateraltzació i asimetries cerebrals dels humans a través de l'estudi de l'endocrani

Treball Final de Grau



Per:

Marta García Ramos

Director:

Carlos Lorenzo Merino

Grau d'Antropologia i Evolució Humana
Universitat Rovira i Virgili i Universitat Oberta de Catalunya
Tarragona - 2024

ÍNDIX

1. RESUM.....	1
2. INTRODUCCIÓ	2
3. OBJECTIUS I PREGUNTES DE RECERCA.....	4
4. ESTAT DE LA QÜESTIÓ.....	5
5. MARC TEÒRIC.....	9
5.1 L'antropologia virtual	10
5.1.1 Digitalitzar.....	12
5.1.2 Exposar.....	13
5.1.3 Comparar.....	13
5.1.4 Reconstruir	14
5.1.5 Materialitzar	14
5.1.6 Compartir	15
6. MATERIALS I MÈTODES	16
6.1 Materials	16
6.2 Mètodes.....	17
6.2.1 La creació d'endocasts	17
6.2.2 3D Slicer.....	19
6.2.3 Càlcul del volum i determinació de les petalies.....	21
6.2.4 Tractament estadístic de les dades.....	22
6.2.5 Revisió bibliogràfica	22
7. ANÀLISI I RESULTATS	23
7.1 El volum dels endocasts.....	23
7.2 Les asimetries cerebrals	28
7.3 Les asimetries cerebrals en hominins i primats no humans.....	31
7.4 Les asimetries cerebrals i la lateralització manual.....	34
8. DISCUSSIÓ	37
9. CONCLUSIÓ	41
10. BIBLIOGRAFIA	43

“The cerebrum is the crown jewel of creation and evolution” (Rhoton, 2007).

AGRAÏMENTS

En agraïment a Carlos Lorenzo, tutor del Treball Final de Grau, per la seva confiança, orientació, paciència i suport, per acompanyar-me durant aquest projecte i per tot el coneixement que ha compartit amb mi.

També a la meva família, pel constant suport i els ànims durant aquests anys.

1. RESUM

La lateralització present en els humans deguda a les asimetries cerebrals, és a dir, a les diferències anatòmiques, bioquímiques i funcionals entre ambdós hemisferis, presenta molts avantatges i està principalment relacionada amb la capacitat verbal i la manipulació d'objectes. La paleoneurologia estudia l'anatomia i l'evolució del cervell mitjançant l'anàlisi d'endomolles, creats a partir de les cavitats endocranials, els quals mostren l'anatomia externa del cervell. L'estudi dels endocasts i els resultats extrets d'aquests estudis han de ser tractats amb molta cura, ja que sols ens aporten informació sobre la forma del cervell i els seus elements corticals. En aquesta investigació treballarem amb una mostra representativa de 30 individus del gènere *Homo sapiens*, amb el mateix nombre d'individus de cada sexe, a partir de la qual estudiarem els endocasts per tal de conèixer i quantificar les asimetries cerebrals, en concret les petalies, presents en aquesta espècie i les possibles relacions amb la lateralitat manual.

Paraules claus: asimetries cerebrals, petalia, lateralització, endocrani, *Homo sapiens*.

Abstract: The lateralization present in humans due to brain asymmetries, that is, anatomical, biochemical and functional differences between the two hemispheres, has many advantages and is mainly related to verbal ability and object manipulation. Paleoneurology studies the anatomy and evolution of the brain through the analysis of endomolds, created from endocranial cavities, which show the external anatomy of the brain. The study of the endocasts and the results extracted from these studies must be treated with great care, since they only give us information about the shape of the brain and its cortical elements. In this research we will work with a representative sample of 30 individuals of the genus *Homo sapiens*, with the same number of individuals of each sex, from which we will study the endocasts to know and quantify the cerebral asymmetries, particularly the petalias, present in this species and the possible relationships with manual laterality.

2. INTRODUCCIÓ

El cervell forma part del Sistema Nerviós Central, el qual està compost per la medulla espinal i l'encèfal, format pel tronc encefàlic, el cervell i el cerebel. El cervell és l'òrgan que controla l'inici i la coordinació del moviment, la temperatura, el tacte, la visió, l'audició, el raonament, les emocions, l'aprenentatge i la cognició i està protegit pel crani i les meninges. El cervell, una massa de teixit bla, està constituït per dos hemisferis, l'hemisferi dret i l'hemisferi esquerre i es divideix en 4 lòbuls principals, el lòbul frontal, parietal, temporal i occipital (Jacobson & Marcus, 2008; Rhoton, 2007).

La majoria d'espècies animals presenten una simetria cerebral, és a dir, els dos hemisferis cerebrals, els quals controlen els aspectes motors i sensorials de la part contrària del cos, són iguals i simètrics, a excepció dels humans i d'altres espècies de primats, ocells i rates (Mosquera, 2005). Els humans, juntament amb els primats antropoides, són les espècies que presenten unes asimetries cerebrals més destacables. En humans, aquestes asimetries comporten i són producte de la lateralització cerebral, és a dir, de l'existència de diferències funcionals entre els dos hemisferis.

La lateralització cerebral està relacionada amb la capacitat verbal (Bishop, 2013) i la manipulació d'objectes (Greenfield, 1991; Llorente et al., 2008; Stout & Chaminade, 2012; Uomini & Meyer, 2013). A més, la lateralització augmenta la capacitat del cervell per a executar múltiples tasques alhora; evita la duplicació innecessària de funcions, és a dir, maximitza l'espai disponible per al teixit neural; augmenta la velocitat de processament degut a la reducció de la comunicació interhemisfèrica a través del cos callós; i prevé l'inici de respostes incompatibles en els dos hemisferis (Aguilar-Cobeña et al., 2022; Esteves et al., 2021).

Un dels primers a qüestionar-se com era possible que els dos hemisferis del cervell, aparentment iguals, fossin en realitat tan diferents, fou Paul Pierre Broca, el qual en 1861 ja va informar sobre una sorprenent asimetria en un pacient famós anomenat Louis Victor Leborgne (Broca, 1861). Però, anteriorment, el metge francès Marc Dax ja havia informat de tres casos que mostraven dominància cerebral esquerra (Corballis, 2019).

Respecte a la lateralitat manual un dels primers investigadors en aquest camp fou Thomas Watson (1871), el qual va tractar de descobrir perquè la majoria de les persones són

destres i si existeix alguna relació entre la lateralització manual i l'hemisferi on es troba el llenguatge.

La preferència gairebé universal per la mà dreta, cosa que implica un predomini de l'hemisferi esquerre per a l'acció manual, ha estat durant molt de temps una font de fascinació, ja que s'estén per totes les cultures humanes, i ha servit com una potent font de simbolisme en moltes cultures (Hertz, 1960). El predomini de la mà dreta, la mà més hàbil en la major part de la població, ha provocat una associació de la “dreta” amb valors positius i de l’“esquerra” amb valors negatius, com s'evidencia en el contrast entre termes com destre i hàbil, amb termes com a maldestre i sinistre (Corballis, 2019).

Les asimetries anatòmiques del cervell humà presenten una gran complexitat, ja que són més marcades quan el cervell creix i madura i perquè existeixen asimetries de diferents dimensions. Entre les més comunes, destaquen les petalies, on un hemisferi sobresurt cap a l'altre hemisferi deixant unes marques a l'interior del crani (Aguilar-Cobeña et al., 2022; García-Tabernero, 2018).

Aquest treball pretén estudiar i quantificar les asimetries cerebrals presents en individus de l'espècie *Homo sapiens* mitjançant l'estudi d'endocasts generats a partir de les marques que el cervell deixa a l'interior del crani. Els endocasts s'han creat a partir de les tomografies computades de 30 cranis que s'han obtingut del repositori NESPOS (Pleistocene People and Places) que gestiona el Neanderthal Museum.

3. OBJECTIUS I PREGUNTES DE RECERCA

L'objectiu principal d'aquest treball és estudiar i quantificar les diferents asimetries cerebrals presents en *Homo sapiens*.

Amb la realització d'aquesta investigació es pretén respondre a les següents preguntes:

- Hi ha una diferència de volums entre ambdós hemisferis?
- Existeix relació entre les asimetries i el sexe?
- Quina relació existeix entre les asimetries i la lateralitat manual?

4. ESTAT DE LA QÜESTIÓ

El descobriment per part del neuroanatomista Raymond Dart, l'any 1924, del primer crani d'*Australopithecus africanus*, corresponent a un individu infantil conegut com el Nen de Taung (Dart, 1925) va generar una curiosa coincidència, ja que Dart era especialista en anatomia cerebral i el crani va fossilitzar de forma que el sediment que havia entrat en el crani es va convertir en un motlle fòssil del cervell, el que va provar el naixement de la paleoantropologia i la paleoneurologia humana (Bruner, 2012). La paleoneurologia és la disciplina que utilitza els endocasts, motlles positius de la cavitat endocranial, per obtenir informació sobre el cervell i la relació entre aquest i el crani.



Figura 1. Crani d'*Australopithecus africanus* amb el sediment que conforma un motlle fòssil del cervell (Dart, 1925).

Un dels aspectes cerebrals més estudiats són les asimetries cerebrals. Estudis realitzats mitjançant ressonàncies magnètiques (Kertesz et al., 1986, 1990; Watkins et al., 2001) han mostrat que en el cas dels humans les asimetries més habituals estan representades per un lòbul occipital esquerre més gran i que sobresurt cap enrere i un lòbul frontal dret de major mida que sobresurt cap endavant (Aguilar-Cobeña et al., 2022; Chui & Damasio, 1980; Toga & Thompson, 2003). Aquestes asimetries es coneixen com a petalies frontals i occipitals, terme utilitzat originalment per a referir-se a les impressions deixades per aquestes protuberàncies en la superfície interna del crani. Vinculat a les petalies frontals dretes i occipitals esquerres existeix una torsió, coneguda com la torsió de Yakovlev, una torsió en sentit antihorari on el lòbul occipital esquerre s'estén a través de la línia mitjana cap a la dreta i el lòbul frontal de l'hemisferi contrari s'estén cap a l'esquerra (LeMay, 1976).

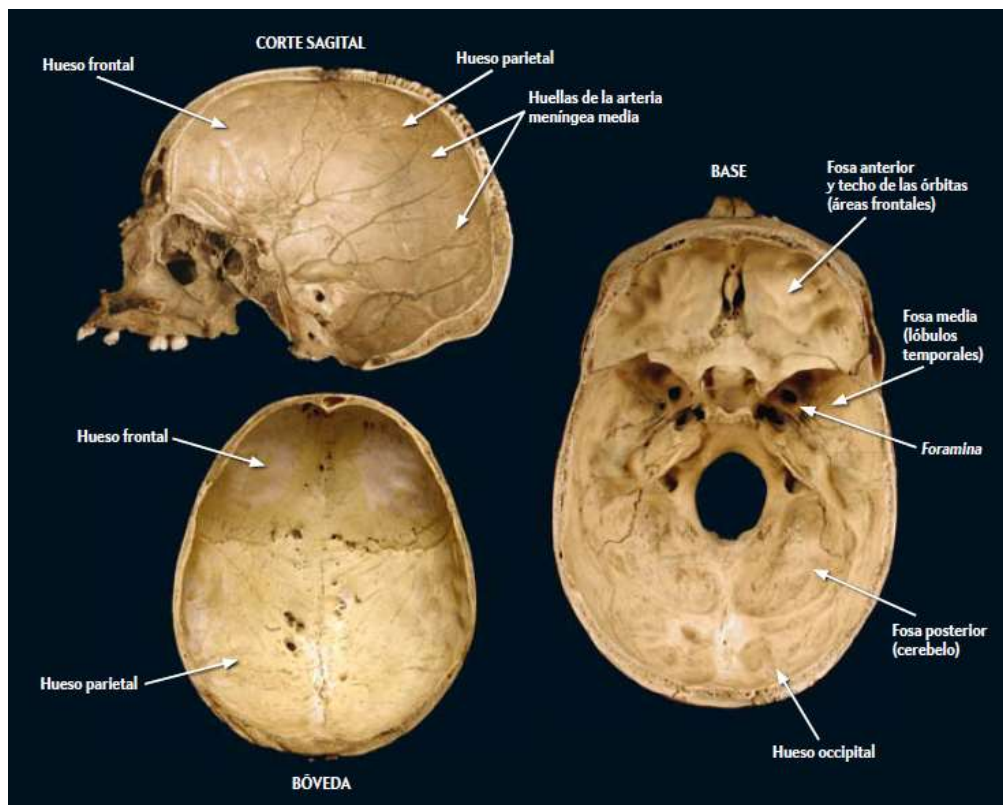


Figura 2. Part interna del crani amb les principals estructures i marques òssies (Bruner, 2012).

Estudis com el de Watkins et al. (2001) han descrit altres asimetries cerebrals com asimetries en diverses àrees posteriors del llenguatge, és a dir, en el pla temporal i en la circumvolució angular major esquerres; una asimetria en l'escorça insular anterior, major en l'hemisferi dret, i una asimetria de forma del solc lateral posterior del cervell que provoca una diferència de mida dels lòbuls temporals (Westbury et al., 1999).

Les petalies s'han relacionat amb la lateralitat manual (Greenfield, 1991; Llorente et al., 2008; Stout & Chaminade, 2012; Uomini & Meyer, 2013) i la capacitat verbal (Bishop, 2013; Chance & Crow, 2007; Falzi et al., 1982; Papadatou-Pastou, 2011; Powell et al., 2012). S'ha demostrat que l'existència de la petalia frontal dreta i occipital esquerra està associada a les persones dretanes (Cashmore et al., 2008; Holloway & De La Costelareymondie, 1982; Kertesz et al., 1986; LeMay, 1976; LeMay & Kido, 1978; Watkins et al., 2001). En el cas de les persones esquerranes, predomina una asimetria inversa, malgrat que també és dona la petalia típica dels individus dretans o una manca d'asimetria (Galaburda et al., 1978).

La lateralitat manual està relacionada amb l'hemisferi amb major desenvolupament de l'àrea de Broca, és a dir, amb l'hemisferi on es troba la dominància del llenguatge (Knecht et al., 2000). Mazoyer et al., (2014) i Gilbert & Wysocki (1992) han confirmat que almenys el 85% de les persones tenen en l'hemisferi esquerre el domini del llenguatge i una proporció similar, entre el 85-90% de la població (Amunts et al., 2000; Cashmore et al., 2008; Chui & Damasio, 1980; Papadatou-Pastou, 2011), són destres. Pel que fa a les persones esquerranes, aquestes representen un 10% de la població (Amunts et al., 2000; Cavill & Bryden, 2003; Holtzen, 1994); metre que entre l'1-5% són persones ambidextres (Crow et al., 1998; Rodriguez et al., 2010). Com ja van establir Foundas et al. (1998) i Powell et al. (2012) l'àrea

44 de Brodmann que juntament amb l'àrea 45 conforma l'àrea de Broca, està més desenvolupada en l'hemisferi esquerre en persones destres i en l'hemisferi dret en esquerranes.

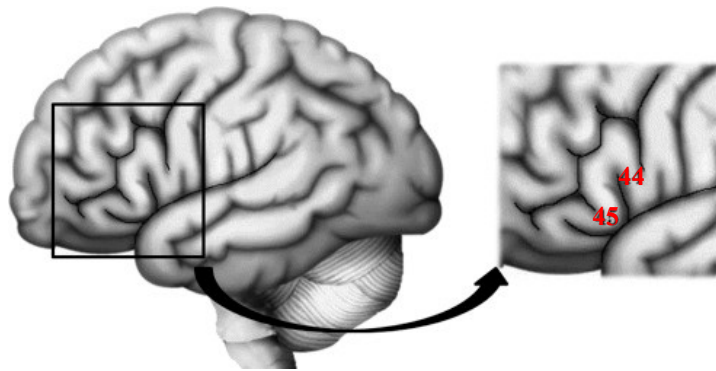


Figura 3. Àrea de Broca, formada per l'àrea 44 i 45 de Brodmann (Poza-Rey et al., 2017).

Però, diversos investigadors i investigadores han negat l'existència d'una relació entre la lateralitat i les asimetries cerebrals. Chui & Damasio (1980) postulen que la preferència d'una mà sobre l'altra i les petalies són dues variables independents i afirmen que no hi ha diferències significatives entre destres i esquerranes. Les investigacions de Faglioni i Scarpa (1989) i Steele (2000) han conclòs que existeix una dèbil associació entre aquests dos factors, tal com demostren estudis de morfometria d'asimetries estructurals basats en vòxels, els quals no han demostrat cap mena de relació entre la lateralitat i les asimetries cerebrals (Good et al., 2001; Hervé et al., 2006; Watkins et al., 2001).

Els estudis sobre asimetries cerebrals també s'han realitzat en primats no humans mitjançant endomòtles i imatges de ressonància magnètica (Holloway & De La Costelareymondie, 1982; Phillips & Sherwood, 2007; Pilcher et al., 2001). L'ús de diverses metodologies d'anàlisi ha generat diversos resultats i determinació de les petalies, de forma que hi ha estudis (Hopkins & Marino, 2000; Pilcher et al., 2001) que determinen que la petàlia frontal dreta i occipital esquerra és majoritària entre els grans simis, mentre que d'altres (Holloway & De La Costelareymondie, 1982; LeMay, 1976)

afirmen que en aquestes espècies es dona amb més freqüència la petalia frontal esquerra i occipital dreta. Els estudis sobre els micos del Vell i el Nou Món han generat també una gran quantitat d'informació amb diversos resultats. Els estudis de Cheverud et al. (1990) determinen que existeix una petalia frontal dreta i occipital esquerra (Falk et al., 1990; LeMay, 1976), mentre que d'altres no han revelat cap asimetria significativa (Hopkins & Marino, 2000; Pilcher et al., 2001).

Pel que fa a espècimens fòssils, s'han realitzat estudis en diverses espècies. Entre els endocasts de Ngandong (*Homo erectus asiàtic*), quatre dels cinc estudiats exhibien el patró de petalia frontal dreta i occipital esquerra, igual que en els humans moderns (Holloway, 1980). També presenten aquest tipus d'asimetria KNM-WT 15000, OH 13, OH 16, ER 1470, ER 3733, ER 3883, WT 15000, Ckn.E.PA.16, Ckn.L.1.PA.98 i Ckn.L.3.PA.100, mentre que ER 1813 i Ckn.L.2.PA.99 mostren una petalia frontal esquerra i occipital dreta (Begun & Walker, 1993; Holloway et al., 2004; Poza-Rey et al., 2017). Respecte als *Homo neanderthalensis*, els individus de Feldhofer, La Ferrassie 1, Forbes Quarry 1, La Quina, Le Moustier 1, Saccopastore 1, Spy 1, Spy 2, Teshik-Tash 1 i Engis 2 també presenten el mateix patró que els humans actuals, a excepció dels individus de La Chapelle-aux-Saints que presenten asimetries pròpies d'individus esquerrans (Frayser et al., 2012; Holloway, 1981; Holloway & De La Costelareymondie, 1982; LeMay, 1977; Uomini, 2011).

Altres estudis com el de Poza-Rey et al. (Poza-Rey et al., 2017) on s'estudia la lateralitat d'un grup d'individus de la Sima de los Huesos (Atapuerca) a partir de la comparació dels resultats de l'estudi dels endocasts de 17 cranis de preneandertals i dels resultats de la determinació de la lateralitat a partir d'estriacions labials en la dentició anterior (Lozano et al., 2009) mostren com la proporció entre persones destres i no destres difereix entre els preneandertals i els humans moderns. En total, de les 12 assignacions que es van poder realitzar en aquest estudi, 5 individus eren destres i 7 no destres, el que indica que la proporció de destres i no destres entre els individus de la Sima de los Huesos és de 4/6, una proporció que difereix de la proporció 9/1 de les poblacions d'humans moderns.

Un estudi portat a terme a partir d'una mostra de 41 endocasts parcials i complets d'Australopitecs i membres del gènere *Homo* (Holloway & De La Costelareymondie, 1982) va demostrar que aquests grups mostren una configuració de petalies similars a les d'*Homo sapiens*, és a dir, aquesta no és una característica pròpia de la nostra espècie.

5. MARC TEÒRIC

La Paleoneurologia és una disciplina que obté informació sobre la morfologia i l'anatomia cerebral d'espècies fòssils gràcies a l'estudi d'endomotlles (Bruner, 2004, 2015, 2020; Holloway et al., 2004). Malgrat que tradicionalment s'ha estudiat majoritàriament la mida del cervell, també es realitzen estudis paleoneurològics sobre patrons vasculars (Kimbel, 1984), asimetries cerebrals (Holloway & De La Costelareymondie, 1982; LeMay, 1976) o circumvolucions específiques.

Durant el desenvolupament de l'encèfal, especialment del cervell, aquest exerceix pressió sobre el crani, de forma que la morfologia del cervell, les seves circumvolucions, solcs i girs, queda marcada en la part interna del crani. També queden marques dels grans cursos venosos intracranials, especialment de la duramàter, d'artèries i de nervis, encara que en un grau més baix (García-Taberner, 2018). Considerant l'estreta relació que existeix entre la forma del cervell i els ossos del crani (Bruner, 2021; Moss & Young, 1960), els endomotlles de cranis fòssils són una font d'informació útil sobre la morfologia i l'anatomia cerebral dels homínids. L'endocast és un motlle positiu de la cavitat endocranial amb la mateixa

morfologia que aquesta, ja que el cervell és un òrgan que no fossilitza, de forma que l'única manera de poder estudiar-lo és mitjançant la investigació de la cavitat endocranial (Bruner, 2004; Holloway, 2018; Neubauer, 2014).

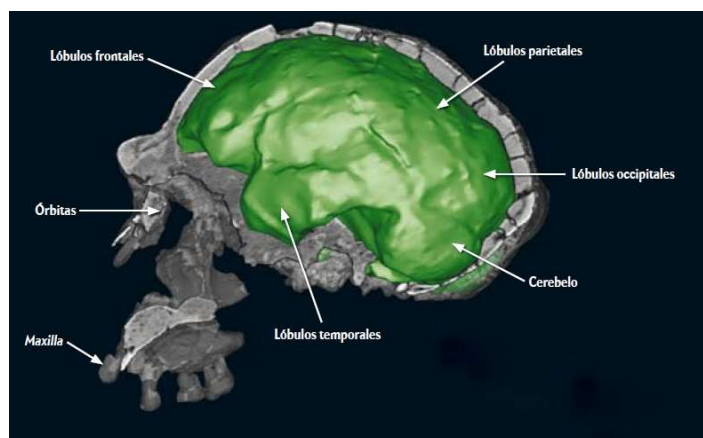


Figura 4. Endocast (verd) en relació amb el crani (individu KNM-ER3733, *Homo ergaster*) (Bruner, 2012).

Per descomptat, un endocast no és un cervell, sinó una simulació de la superfície del cervell, és a dir de la seva morfologia externa i, per tant, presenta diverses limitacions com una gran pèrdua d'informació perquè només les circumvolucions, solcs i fissures que es troben en la superfície externa de l'escorça cerebral, és a dir aquelles que tenen contacte directe amb l'os deixen empremtes cranials (Bruner, 2021; Toga & Thompson, 2003). Una altra limitació és la grandària i composició de les mostres, ja que el registre fòssil és

generalment pobre i és possible que els individus no representen adequadament a la seva pròpia espècie (Bruner, 2021).

Els endomolles foren durant molts anys fabricats amb làtex de cautxú, algeps de París, diversos cautxús a base de silicona i Admold (massilla dental). Aquests mètodes més antics han sigut reemplaçats per la realització d'endocasts virtuals mitjançant diversos procediments d'escaneig i de producció d'endocasts virtuals.

5.1 L'antropologia virtual

L'antropologia és una ciència excepcionalment comparativa i holística, ja que explora la diversitat humana en el temps i en l'espai, estudia tota la condició humana, el seu passat, present i futur, i la seva biologia, la societat, el llenguatge i la cultura (Kottak, 2011). L'amplitud dels estudis antropològics ha donat lloc a la creació de diferents subdisciplines que s'interessen pels diversos aspectes de la condició humana com l'arqueologia, la paleoantropologia, l'antropologia forense, la bioarqueologia i l'antropologia virtual, les quals ajuden a conèixer millor el nostre passat.

El terme antropologia virtual va ser publicat per primer cop a la fi dels anys 1990 (Weber et al., 1998) des de la perspectiva dels antropòlegs amb la intenció d'aplicar-se principalment a qüestions biològiques relacionades amb homínides recents i fòssils. L'antropologia virtual (Weber, 2001; Weber et al., 1998) explota tecnologies digitals i reuneix experts de diferents camps com per exemple de l'antropologia, la primatologia, la medicina, la paleontologia, les matemàtiques, l'estadística, la informàtica i l'enginyeria per a produir còpies virtuals permanentment disponibles d'espècimens i dades que quantifiquen de manera integral la geometria, incloses regions anatòmiques prèviament ignorades. A més, pot ajudar a identificar trets nous i ocults, la qual cosa és especialment important en paleoantropologia, on l'escassetat de material exigeix extraure informació de restes fragmentàries (Weber, 2015).

“L'antropologia virtual és una aproximació multidisciplinària per a estudiar les dades anatòmiques, particularment d'humans, dels seus avantpassats i dels seus parents més propers, en tres o quatre dimensions (espai i espai-temps). L'anàlisi quantitativa de les estructures biològiques amb major o menor detall és un element clau, igual que la presència de dades digitals. Aquesta fusió d'antropologia, matemàtiques, física, ciències computacionals, medicina i disseny industrial

incorpora coneixements tècnics per a aplicacions que abasten la biologia evolutiva, el desenvolupament i creixement dels homínids, la medicina forense, la morfologia funcional, el diagnòstic mèdic i l'ensenyament” (Weber & Bookstein, 2011: 2).

El terme virtual és definit pel Diccionari Normatiu Valencià com “que s’ha creat artificialment, per analogia amb el món real, i es representa en un sistema audiovisual” (Acadèmia Valenciana de la Llengua, s.d.). És a dir, l’antropologia virtual és l’antropologia d’elements virtuals, d’elements que sols existeixen en l’espai digital.

Alguns dels primers investigadors que van emprar l’antropologia virtual foren Conroy i Vannier (1984), els quals van utilitzar les dades obtingudes dels escanejos tomogràfics computacionals (CT) i les imatges tridimensionals per a eliminar electrònicament la matriu del crani del nen de Taung i poder així investigar la cavitat cranial i determinar el desenvolupament dental de l’individu (Conroy & Vannier, 1987). Zollikofer et al. (1995) van reconstruir virtualment neandertals i altres fòssils i Conroy et al. (1998) van crear endocasts virtuals d’*Australopithecus africanus* fent servir el mateix enfocament.

L’antropologia virtual presenta diversos avantatges en comparació amb les anàlisis tradicionals. L’accessibilitat a totes les estructures anatòmiques; la disponibilitat permanent de còpies virtuals; la

inexistència de barreres físiques que dificulten la investigació; la precisió controlable i la reproductibilitat dels mesuraments; la possibilitat d’obtenir una gran quantitat d’informació per a l’anàlisi morfomètrica; la possibilitat de compartir dades fàcilment, i la manipulació del material sense causar cap dany són alguns dels avantatges que presenta l’antropologia virtual (Weber, 2001). Aquesta metodologia es divideix en sis àrees



Figura 5. Les sis àrees operatives de l’Antropologia Virtual. S’indiquen els camins més comuns entre les diferents fases (Weber, 2015).

operatives o fases: digitalitzar, exposar, comparar, reconstruir, materialitzar i compartir (Weber & Bookstein, 2011).

5.1.1 Digitalitzar

Per tal de digitalitzar els fòssils es realitzen Tomografies Computades (CT). Aquest escàner fou desenvolupat per Godfrey Hounsfield, enginyer elèctric, i el físic Allan MacLeod Cormack. L'any 1971, es va incorporar l'ús de les CTs a la pràctica mèdica amb la documentació d'un quist cerebral en un participant de l'Hospital Atkinson Morley (Bhattacharyya, 2016; Petrik et al., 2006; Tan & Poole, 2020).

La tomografia computada és un estudi de raigs X, en el qual el tub de raigs X gira, a través d'una estructura circular coneguda com a pòrtic, al voltant d'una part específica del cos i es produeixen imatges transversals generades per computadora. El pacient o la resta arqueològica o paleontològica

a estudiar es col·loca sobre una taula, la qual es mou cap amunt o cap avall per generar diferents imatges transversals. En cada rotació, es construeix un tall d'imatge 2D. Quan s'obté el nombre desitjat de talls, es reproduïx un escaneig en la imatge de la computadora i es pot reproduir i emmagatzemar fàcilment (Bottari et al., 2021).

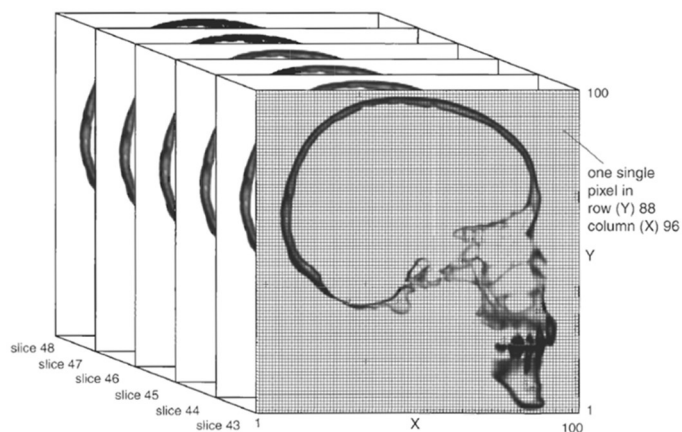


Figura 6. Seqüència de talls obtinguda a partir d'una tomografia computada. Cada tall està format per píxels que prenen diferents valors de gris (Weber & Bookstein, 2011).

Aquest mètode elimina la superposició d'estructures i els artefactes de projecció que s'observen en les radiografies de pel·lícula, té una resolució de contrast superior a la de les radiografies normals (Oppelt, 2005) i permet obtenir imatges multiplanars reformatades, és a dir, les dades es poden visualitzar com una imatge en tres plans ortogonals (Weber & Bookstein, 2011).

Fou en els anys 80 quan va començar a ser utilitzat principalment en medicina, però al mateix temps van començar a aparèixer els primers estudis sobre l'aplicació d'aquesta tècnica en fòssils. L'any 1980 Jan Wind va reconèixer la importància de les CTs per a

resoldre els problemes d'alta mineralització que presentaven molts ossos. Els seus estudis sobre un crani d'*Homo erectus* realitzats amb CT van demostrar els beneficis d'aquest mètode davant dels rajos X, que eren emprats fins al moment. De les imatges obtingudes va poder identificar fractures presents en el crani, estructures de l'oïda mitjana, la mida dels canals vasculars i nerviosos i la pneumatització de l'os (Weber & Bookstein, 2011). Posteriorment, Fleagle i Simons (1982) van utilitzar la CT per a estudiar els ossos llargs d'un primat de l'Oligocè, i Tate i Cann (1982) es van centrar en el perfeccionament tècnic dels mètodes que permetien l'aplicació de la CT mèdica a fòssils molt mineralitzats.

5.1.2 Exposar

Les representacions virtuals mostren característiques morfològiques que són inaccessibles quan l'estudi es realitza en l'espai real com, per exemple, l'interior del neurocrani, els sins frontals i maxil·lars, l'oïda interna, les arrels dentals, l'espessor dels ossos, l'arquitectura trabecular i les sutures òssies. Per poder estudiar aquestes estructures cal segmentar-les, és a dir, separar-les virtualment de les estructures del voltant, per poder ser tractades com unitats independents (Weber & Bookstein, 2011). Mitjançant la segmentació, els vòxels que per al programari únicament tenen una posició i valor de gris, adquireixen una nova qualitat que els marca com a pertanyents a una unitat diferent, de forma que esdevenen un objecte virtual que es pot representar (Weber, 2015).

La segmentació també es pot emprar per a separar l'objecte de la matriu, fent servir una característica especial de la segmentació, la "preparació electrònica", en la qual cal eliminar les restes abans d'estudiar el fòssil. La dificultat de l'eliminació de la matriu varia àmpliament segons la diferència existent entre el rang de grisos de l'os i de la matriu. En aquest cas, l'antropologia virtual permet eliminar la matriu de forma virtual sense danyar la mostra original i poder desfer els moviments realitzats. L'escaneig dels exemplars és recomanable també quan es pretén eliminar la matriu físicament, ja que ajuda a planificar la tasca i tenir en compte les àrees potencialment problemàtiques (Weber, 2015).

5.1.3 Comparar

La disponibilitat de dades en format digital que aporta l'antropologia virtual permet convertir la morfologia, exterior o interior, de la resta estudiada en un conjunt complet de números descriptius. La gestió d'aquestes dades per part de determinats softwares permet condensar grans quantitats d'informació i fer que les peculiaritats siguin fàcilment visibles mitjançant simulacions. D'aquesta manera, es redueixen les avaluacions i qualificacions

subjectives, la peça estudiada no és tractada com un conjunt de característiques independents entre si, es poden realitzar estudis amb diverses característiques que provenen de centenars o, fins i tot, milers d'individus i s'aconsegueixen resultats reproduïbles (Weber, 2015).

5.1.4 Reconstruir

Les restes fòssils presenten en moltes ocasions fractures o modificacions degudes a processos tafonòmics o a accions realitzades durant l'excavació que poden dificultar el seu estudi. Es distingeixen quatre tipus diferents de pertorbacions (Weber & Bookstein, 2011):

- Pertorbació de tipus 1: l'objecte o resta està complet, però trencat en fragments i no conserva la forma original.
- Pertorbació de tipus 2: l'objecte o resta està incomplet perquè hi falten parts.
- Pertorbació de tipus 3: l'objecte o la resta està deformat.
- Pertorbació de tipus 4: l'objecte o resta no és accessible o ho és parcialment a causa d'un recobriment de material.

En la majoria dels casos aquestes pertorbacions no es troben aïllades, sinó que, amb freqüència, es troben tot tipus de combinacions d'aquestes pertorbacions en una única resta.

La reconstrucció consisteix a reconèixer i corregir la pertorbació, reconeixent que mai esdevindrà una còpia de l'original, sinó una aproximació, ja que en la majoria dels casos no tenim la suficient informació sobre la forma original. L'antropologia virtual permet realitzar diverses manipulacions sense danyar la resta i són reproduïbles, ja que es poden registrar i s'utilitzen dades de referència quantitatives. A més, aquest tipus de manipulació ofereix un control absolut sobre les translacions i rotacions de fragments i la possibilitat de la fusió de peces en la pantalla i la possibilitat de reflectir-les (Weber, 2015).

5.1.5 Materialitzar

Materialitzar significa fer una còpia real d'un model virtual, la qual pot ser emprada en l'àmbit de l'ensenyament i la formació, per exposicions permanents en museus o per a ajudar a la investigadora en la comprensió de les relacions tridimensionals d'estructures espacialment complexes (Weber, 2015). Reconvertir un objecte que ha sigut escanejat i modificat virtualment en un objecte real un altre cop és possible gràcies al *rapid prototyping* (RP), és a dir, a la creació ràpida de prototips. Una de les primeres tècniques

de RP, l'estereolitografia (Mankovich et al., 1990), va ser emprada per a realitzar un motlle del crani de l'home de gel tirolès (Seidler et al., 1992; zur Nedden et al., 1994). Aquest terme fa referència als processos de fabricació utilitzats per a la producció ràpida de peces i basats en dades digitals. És a dir, mitjançant els RP es crea una còpia real de l'objecte virtual a partir de les dades procedents d'escàners 3D com, per exemple, els escàners tomogràfics o els de superfície (Weber & Bookstein, 2011).

Els models RP són de gran utilitat, ja que presenten diversos avantatges com la possibilitat de realitzar còpies sempre que sigui necessari, de representar estructures buides o internes i de poder determinar l'escala de l'objecte a imprimir. A més, no és necessari un motlle físic, ni el contacte amb l'objecte original durant el procés. A més de l'estereolitografia (STL), s'empren altres mètodes com la modelització per deposició fosa, la sinterització selectiva per làser i la impressió 3D (Weber & Bookstein, 2011).

5.1.6 Compartir

A mesura que l'accés a Internet es generalitza, algunes ciències han vist un augment en l'intercanvi d'informació. Cada cop existeixen un major nombre de revistes d'accés obert i arxius de dades en diferents camps d'investigació. El progrés científic ha de fonamentar-se en la compartició de mètodes, recursos i dades per crear un ampli conjunt d'informació compartida i estructurada que permeti realitzar estudis i anàlisis de dades més potents i amb una major difusió dels nous coneixements (Weber, 2015). L'accés a col·leccions d'exemplars és molt important en l'àmbit de la paleoantropologia, ja que es produeixen constants descobriments de fòssils i noves anàlisis i descripcions de fòssils ja descoberts utilitzant tecnologies millorades (Weber & Bookstein, 2011).

L'antropologia virtual és un dels àmbits on compartir dades i material és més senzill perquè no existeixen barreres físiques, de forma que el treball virtual es pot estendre a qualsevol laboratori o centre de recerca. A més, la creixent disponibilitat, la reducció de costos i la dependència de les dades digitals conduiran a un major intercanvi de dades i de mostres comparatives humanes i de primats (Weber, 2015).

6. MATERIALS I MÈTODES

6.1 Materials

Aquest treball s'ha dut a terme gràcies al repositori NESPOS (Pleistocene People and Places) que gestiona el Neanderthal Museum i mitjançant el qual s'ha tingut accés a les CTs que s'han emprat per a realitzar les següents fases del procés i poder portar a terme la investigació. NESPOS és una col·lecció digital que es va crear en el marc del projecte TNT (The Neanderthal Tools, programa de la UE "Digicult") com una base de dades en línia accessible internacionalment. En aquest repositori es recopilen dades antropològiques i arqueològiques relacionades amb la investigació neandertal i l'evolució humana, inclosos escanejos 3D, tomografies computades, literatura escanejada, informació del lloc, imatges i taules. Sobretot se centra a crear còpies digitals precises de troballes originals per tal de protegir-les i que poden ser emprades tant en l'àmbit de la investigació com per a l'educació i la divulgació (Stiftung Neanderthal Museum, 2024). Actualment, totes les dades es troben en l'Arxiu Digital del Neanderthal Museum (<https://archiv.neanderthal.de/data/>).

Els 30 cranis procedents del repositori NESPOS corresponen a individus adults, en concret, a 15 homes i 15 dones de diverses parts del món. Dels 30 cranis 11 són d'origen europeu, dels quals 4 són femenins i 7 masculins; 5 provenen d'Àsia, en concret 2 femenins i 3 masculins; 11 són cranis africans amb 7 cranis femenins i 4 masculins, i d'Amèrica provenen 3 cranis, 2 femenins i 1 crani masculí.

Especimen	Sexe	Grup d'edat	Origen	Mida del pixel	Matriu	Nº de talls
ULAC_012	Male	Adult	Europe: Germany (Hannover, Hessen)	0,388992	512x512	544
ULAC_013	Female	Adult	Europe: Germany (Hannover, Hessen)	0,332066	512x512	574
ULAC_016	Male	Adult	Europe: Germany (Sachsen, Pommern)	0,332559	512x512	609
ULAC_019	Male	Adult	Europe: Germany (Sachsen, Pommern)	0,389482	512x512	494
ULAC_033	Male	Adult	Europe: Netherlands	0,332555	512x512	636
ULAC_039	Female	Adult	Europe: Netherlands	0,332572	512x512	597
ULAC_058	Male	Adult	Europe: Norway, Sweden	0,33249	512x512	597
ULAC_060	Male	Adult	Europe: Norway, Sweden	0,332529	512x512	624
ULAC_218	Female	Adult	Europe: Czech Republic, Bohemia	0,38894	512x512	485
ULAC_223	Male	Adult	Europe: Poland	0,33203	512x512	625
ULAC_225	Female	Adult	Europe: Poland	0,33206	512x512	544
ULAC_235	Male	Adult	Asia: Russia ("Cossack")	0,38952	512x512	505
ULAC_257	Male	Adult	Africa: Tenerife, Morocco, Algeria	0,388941	512x512	590
ULAC_258	Male	Adult	Africa: Tenerife, Morocco, Algeria	0,388934	512x512	549
ULAC_318	Female	Adult	Africa: Egypt, Cairo	0,33203	512x512	568
ULAC_319	Female	Adult	Africa: Egypt, Cairo	0,33202	512x512	586
ULAC_324	Female	Adult	Africa: Egypt, Cairo	0,33205	512x512	577
ULAC_336	Female	Adult	Africa: Egypt, Cairo	0,33201	512x512	613
ULAC_343	Female	Adult	Africa: Egypt, Cairo	0,33203	512x512	589
ULAC_770	Female	Adult	Africa: tropical Westafrica	0,332025	512x512	655
ULAC_812	Male	Adult	Africa: "bushman"	0,38895	512x512	567
ULAC_813	Male	Adult	Africa: "bushman"	0,33203	512x512	589
ULAC_814	Female	Adult	Africa: "bushman"	0,33199	512x512	501
ULAC_868	Female	Adult	Asia: Malay, Sumatra	0,332049	512x512	580
ULAC_904	Male	Adult	Asia: China	0,38894	512x512	541
ULAC_909	Male	Adult	Asia: China	0,38886	512x512	524
ULAC_920	Female	Adult	Asia: China	0,332021	512x512	568
ULAC_953	Male	Adult	America: Inuit	0,389016	512x512	544
ULAC_959	Female	Adult	America: Mexico	0,33206	512x512	574
ULAC_962	Female	Adult	South America	0,332057	512x512	604

Taula 1. Taula on s'especifica la informació bàsica de cada crani.

6.2 Mètodes

La metodologia emprada en aquest treball es basa en la metodologia pròpia de l'antropologia virtual, la qual es divideix en sis fases: digitalitzar, exposar, comparar, reconstruir, materialitzar i compartir (Weber & Bookstein, 2011). Per a la realització d'aquest treball sols s'han portat a terme dos d'aquestes sis fases, exposar i comparar.

Al llarg d'aquest treball s'emprarà el terme hominins per referir-nos als humans moderns i a tots els seus avantpassats directes, després de la seva separació amb la branca evolutiva del ximpanzé.

6.2.1 La creació d'endocasts

Mitjançant l'ús de tècniques d'imatges digitals, en aquest cas, de la tomografia computada, s'obtenen seccions bidimensionals del crani. Per tal d'obtenir l'endocast es porta a terme el procés de segmentació, el qual assigna unes característiques definides a cada element de la imatge (píxel, voxel) en funció del seu valor de gris i/o de la seva posició.

La identificació dels elements individuals de la imatge que pertanyen a una determinada regió pot dur-se a terme manualment, de forma que es marquen a mà els vòxels d'interès o els contorns sobre regions de vòxels. La quantitat de dades que contenen les imatges 3D fa que aquest procediment sigui impossible en la pràctica. A més, la intervenció manual és subjectiva i, per tant, poc reproducible. En conseqüència, la segmentació ha de basar-se principalment en processos automatitzats definits per ajustos de paràmetres, però, en l'actualitat, les segmentacions totalment automàtiques no s'ajusten perfectament als desitjos de l'observador, per la qual cosa és necessària, en moltes ocasions, la intervenció manual (Weber & Bookstein, 2011). És a dir, les segmentacions es realitzen de forma semiautomàtica.

Les imatges proporcionades per la tomografia computada mostren com la caixa del crani està buida i plena d'aire, el qual té valors de gris (negre, degut a la seva baixa densitat) diferents dels de l'os (gris clar, a causa d'una major densitat) (Bruner, 2012; Weber, 2015). Aquest fet ajuda a la delimitació entre l'os i l'espai de l'interior del crani. Tall a tall la cavitat cranial es va emplenant per, posteriorment, combinar tots els talls, és a dir, tots els vòxels, i obtenir un nou objecte en 3D, l'endocast virtual.

Cal tenir en compte que la forma dels endocast no és la mateixa que la del cervell original, ja que la cavitat endocranial no està ocupada únicament pel cervell, sinó que comparteix aquest volum amb moltes altres estructures, com les meninges, el líquid cefalorraquidi, les artèries, els sins venosos i els nervis cranials. A més, aquestes capes protectores interfereixen en les marques que queden del cervell en la superfície cranial interna. En la majoria de les regions només és visible una vaga impressió dels girs i solcs (Weber & Bookstein, 2011).

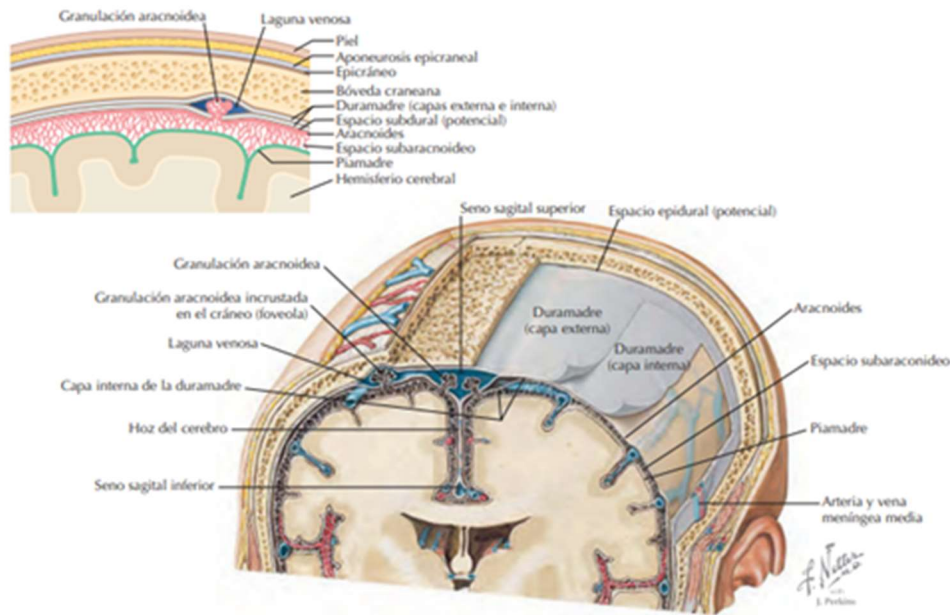


Figura 7. Esquematització de les diferents capes que envolten el cervell i les seves relacions amb l'encèfal i el crani (Felten et al., 2010).

6.2.2 3D Slicer

3D Slicer (Pinter et al., 2019) ha sigut el programari emprat per a realitzar la segmentació dels 30 cranis (15 homes i 15 dones). 3D Slicer és un programari gratuït de codi obert similar a una estació de treball de radiologia que admet visualitzacions versàtils, però també proporciona funcions avançades com la segmentació i el registre automatitzat per a una varietat de dominis d'aplicacions (Fedorov et al., 2012). El projecte 3D Slicer va començar com una manera de proporcionar una plataforma d'investigació comuna amb funcionalitat bàsica i ha evolucionat per a admetre una àmplia varietat d'aplicacions clíniques (Pieper et al., 2004).

David Gering (1999) va presentar el prototip inicial del programari basant-se en l'experiència de grups d'investigació del MIT i del Surgical Planning Lab i des de llavors 3D Slicer ha estat en continu desenvolupament (Grimson et al., 1998). Fou inicialment concebut com un sistema de guia, visualització i anàlisi neuroquirúrgica, però durant l'última dècada, ha evolucionat fins a convertir-se en una plataforma integrada que s'ha aplicat a un gran nombre d'investigacions (Gering et al., 2001).

Aquest programari pretén establir una plataforma de desenvolupament comú per a investigadors dins d'un entorn d'investigació clínica; proporcionar als usuaris una

interfície d'usuari familiar per a fer tasques de visualització i processament d'imatges; fomentar la transferència d'algorismes i tècniques de visualització dels desenvolupadors als usuaris per a la seva avaluació, refinament i ús, i fomentar l'intercanvi d'informació i la col·laboració entre diferents investigadors, departaments i institucions (Pieper et al., 2004).

Aquest programari presenta diverses eines per tal de poder realitzar les segmentacions. Les eines essencials són “threshold”, la qual estableix un llindar per a determinar un rang

dintre de l'escala de grisos; “paint”, mitjançant la qual es pot pintar manualment una zona determinada gràcies a la precisió del pinzell, del qual es pot determinar la seva grossor; “erase” que actua a la inversa que l'eina “paint”; “draw” s'empra per delimitar una zona; “level tracing” el qual defineix un contorn on tots els píxels tenen el mateix valor de l'escala de grisos que el píxel que s'està marcant.

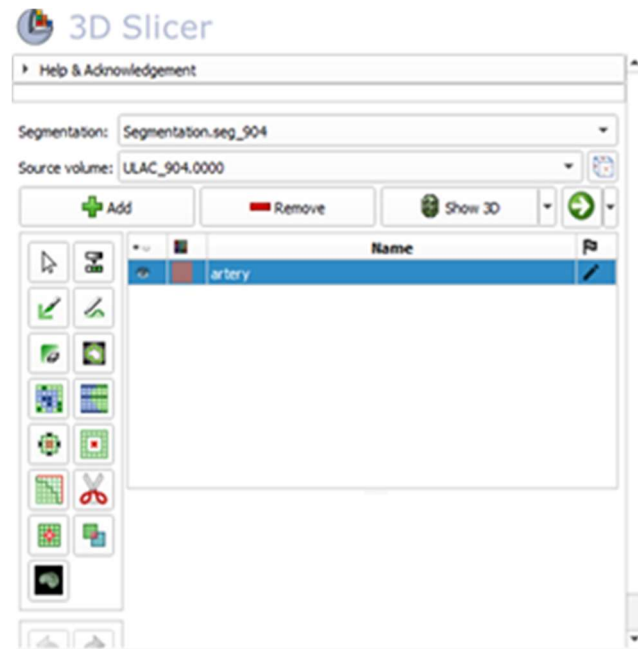


Figura 8. Panell d'eines de segmentació.

Per crear una segmentació cal polsar a “add” i també existeix la possibilitat d'eliminar tota la segmentació gràcies al botó “remove”. A més, cada segmentació es pot nomenar, és a dir, es pot canviar el nom inicialment atorgat pel mateix programari i anomenar-lo com es consideri. També es pot canviar el color de la segmentació i tirar enrere per desfer els moviments realitzats.

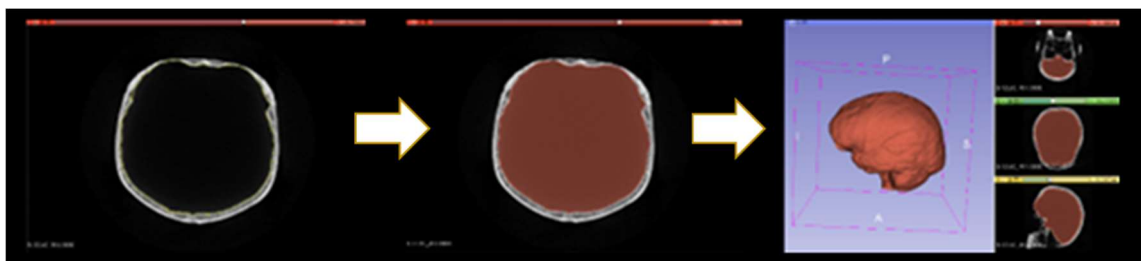


Figura 9. Procés de segmentació emprant 3D Slicer.

6.2.3 Càlcul del volum i determinació de les petalies

Per tal de calcular el volum de cada hemisferi, ha sigut necessari dividir l'endocasts en dos models diferents mitjançant un pla que divideix els dos hemisferis seguint la cissura interhemisfèrica i construït a partir de tres punts, un situat entre els hemisferis frontals, un altre entre els hemisferis occipital i un darrer, al punt superior que separa els lòbuls parietals.

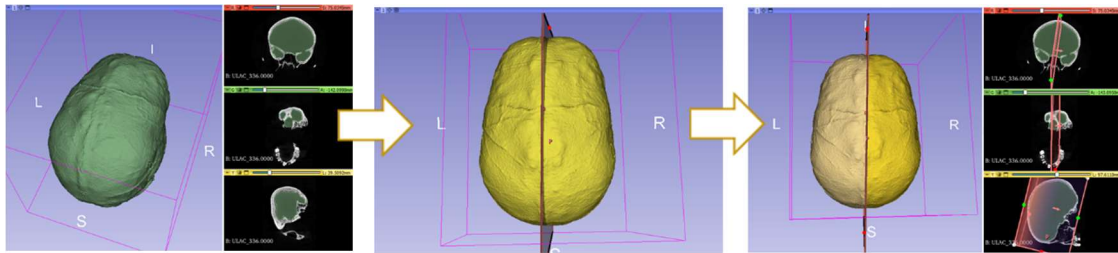


Figura 10. Procés per dividir els dos hemisferis a partir d'un pla.

La determinació de les petalies frontals i occipitals s'ha realitzat seguint el mètode recomanat pel Dr. Falk i desenvolupat i descrit en LeMay et al. (1982) i emprat en estudis com el de Poza-Rey et al. (2017, 2019). Primerament, s'ha calculat la longitud total de l'endocast a partir del punt més anterior de qualsevol dels lòbuls frontals i del punt més posterior de qualsevol dels lòbuls occipitals en direcció paral·lela a la línia mitjana. A partir d'aquesta mesura es calcula el 10% d'aquesta longitud i es desplaça anteroposteriorment des del punt frontal més projectat i posteroanteriorment des del punt occipital més projectat. La longitud dels pètals frontals correspon a la distància entre el punt més anterior de cada lòbul frontal fins a la línia que representa el 10% desplaçat en direcció anteroposterior.

Pel que fa a la longitud dels pètals occipitals, la distància va des del punt més posterior de cada lòbul occipital fins a la línia que representa el 10% desplaçat en direcció posteroanterior. Per conèixer l'amplada dels pètals, la distància es mesura des de la línia mitjana de l'endocast en el punt situat en el 10% desplaçat en direcció anteroposterior o posteroanterior, segons es tracti de la

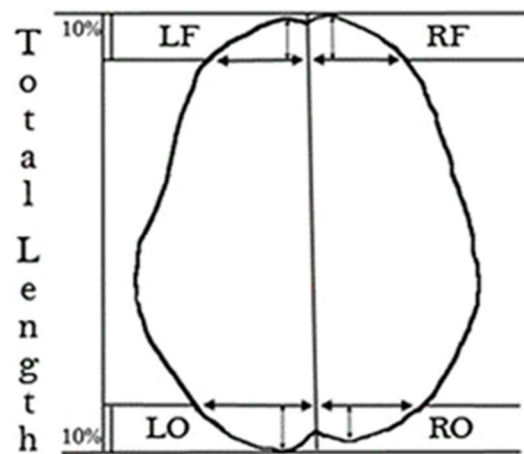


Figura 11. Esquema explicatiu del mètode emprat per a quantificar les petalies (Poza-Rey et al., 2017).

petalia frontal o occipital, fins als límits del perfil del endocast cap a la dreta i cap a l'esquerra. Gràcies a aquestes mesures s'ha pogut determinar quin hemisferi era major en cada cas.

6.2.4 Tractament estadístic de les dades

Les dades obtingudes dels endocasts s'han organitzat en una taula on es recullen tots els cranis, el seu sexe, origen, volum en cc, volum de l'hemisferi esquerre en cc, volum de l'hemisferi dret en cc i la petalia identificada. S'ha realitzat una anàlisi estadística bàsica per tal de poder obtenir dades, fer gràfiques i estudiar la relació entre variables.

6.2.5 Revisió bibliogràfica

Per completar la informació s'ha realitzat també una recerca bibliogràfica en anglès i castellà de documents, llibres i articles de revistes i publicacions científiques sobre l'antropologia virtual, l'anatomia del cervell, les asimetries cerebrals i la lateralitat manual. Per realitzar aquesta cerca s'ha emprat el cercador acadèmic *Google Scholar*.

7. ANÀLISI I RESULTATS

L'anàlisi de les dades obtingudes a partir de l'estudi dels cranis ha permès conèixer el volum encefàlic d'aquests individus, les diferències existents entre sexes, les diferències entre els volums de cada hemisferi i les asimetries cerebrals presents en cadascun dels endocasts estudiats. A més, juntament amb la informació recopilada mitjançant la cerca bibliogràfica s'ha pogut comparar amb altres espècies d'hominins i de primats i relacionar-ho amb la lateralitat manual.

Especimen	Sexe	Grup d'edat	Origen	Volum (cc)	Petalia	Vol. hem. esq. (cc)	Vol. hem. dret (cc)
ULAC_012	Male	Adult	Europe: Germany (Hannover, Hessen)	1720	FD-OE	843,945	876,238
ULAC_013	Female	Adult	Europe: Germany (Hannover, Hessen)	1275	FE-OD	608,069	667,084
ULAC_016	Male	Adult	Europe: Germany (Sachsen, Pommern)	1603	FD-OE	862,539	740,519
ULAC_019	Male	Adult	Europe: Germany (Sachsen, Pommern)	1432	FD-OE	728,295	704,604
ULAC_033	Male	Adult	Europe: Netherlands	1584	FD-OE	796,141	787,883
ULAC_039	Female	Adult	Europe: Netherlands	1448	FE-OD	729,71	718,467
ULAC_058	Male	Adult	Europe: Norway, Sweden	1151	FD-OE	579,613	571,395
ULAC_060	Male	Adult	Europe: Norway, Sweden	1379	FD-OE	697,026	682,381
ULAC_218	Female	Adult	Europe: Czech Republic, Bohemia	1317	FD-OE	658,878	658,797
ULAC_223	Male	Adult	Europe: Poland	1538	FD-OE	763,475	775,42
ULAC_225	Female	Adult	Europe: Poland	1136	FE-OD	556,134	580,245
ULAC_235	Male	Adult	Asia: Russia ("Cossack")	1392	FD-OE	689,285	702,805
ULAC_257	Male	Adult	Africa: Tenerife, Morocco, Algeria	1725	FD-OE	833,884	891,466
ULAC_258	Male	Adult	Africa: Tenerife, Morocco, Algeria	1517	FD-OE	772,061	745,839
ULAC_318	Female	Adult	Africa: Egypt, Cairo	1039	FD-OE	528,46	511,239
ULAC_319	Female	Adult	Africa: Egypt, Cairo	1063	FD-OE	536,526	527,45
ULAC_324	Female	Adult	Africa: Egypt, Cairo	1096	FE-OD	550,878	545,553
ULAC_336	Female	Adult	Africa: Egypt, Cairo	1225	FE-OD	624,086	601,399
ULAC_343	Female	Adult	Africa: Egypt, Cairo	1155	FD-OE	575,6	580,378
ULAC_770	Female	Adult	Africa: tropical Westafrica	1235	FE-OD	613,897	621,814
ULAC_812	Male	Adult	Africa: "bushman"	1430	FD-OE	707,809	722,349
ULAC_813	Male	Adult	Africa: "bushman"	1297	FD-OE	651,617	645,743
ULAC_814	Female	Adult	Africa: "bushman"	1300	FD-OE	652,06	648,8
ULAC_868	Female	Adult	Asia: Malay, Sumatra	1232	FD-OE	628,399	604,209
ULAC_904	Male	Adult	Asia: China	1490	FD-OE	744,217	746,286
ULAC_909	Male	Adult	Asia: China	1544	FE-OD	777,665	767,07
ULAC_920	Female	Adult	Asia: China	1139	FE-OD	573,819	565,905
ULAC_953	Male	Adult	America: Inuit	1536	FE-OD	750,321	786,626
ULAC_959	Female	Adult	America: Mexico	1224	FD-OE	592,656	631,552
ULAC_962	Female	Adult	South America	1011	FD-OE	503,899	507,45

Taula 2. Taula amb totes les dades extretes dels cranis.

7.1 El volum dels endocasts

El volum endocranial ha augmentat significativament des dels 459 cc dels *Australopithecus africanus* o els 481 cc dels *Australopithecus afarensis* (Conroy et al., 1990; Falk et al., 2000; Holloway et al., 2004), fins als 1000-1200 cc de les espècies del Plistocè mitjà, passant pels 800 cc dels primers humans.

En el cas dels parantrops, *Paranthropus aethiopicus* (KNM-WT 17000) (Walker et al., 1986) és el que presenta una menor mida, 410 cc, mentre que els altres membres d'aquest

gènere tenen volums endocranials més grans, com els 485 cc dels *Paranthropus boisei* i els 493 cc dels *Paranthropus robustus* (Falk et al., 2000; Holloway et al., 2004).

Pel que fa als membres del gènere *Homo*, Rightmire (2004) va calcular a partir de 30 cranis d'*Homo erectus* que la capacitat cranial mitjana d'aquesta espècie era de 973 cc. Cranis com el de Bodo (Conroy et al., 1978) i el Broken Hill (Woodward, 1921) demostren un augment de la capacitat cranial. El crani de Bodo, Etiòpia, amb 600 ka, és el crani d'homínid del Plistocè mitjà més antic i més complet i té una capacitat cranial de 1250 cc (Conroy et al., 2000), xifra propera als 1280 cc del crani de Broken Hill (Rightmire, 2017), un crani amb una edat de 299 ka (Grün et al., 2020). Amb els Neandertals i els humans moderns el volum endocranial va augmentar fins a arribar als 1500 cc (Bruner, 2007).

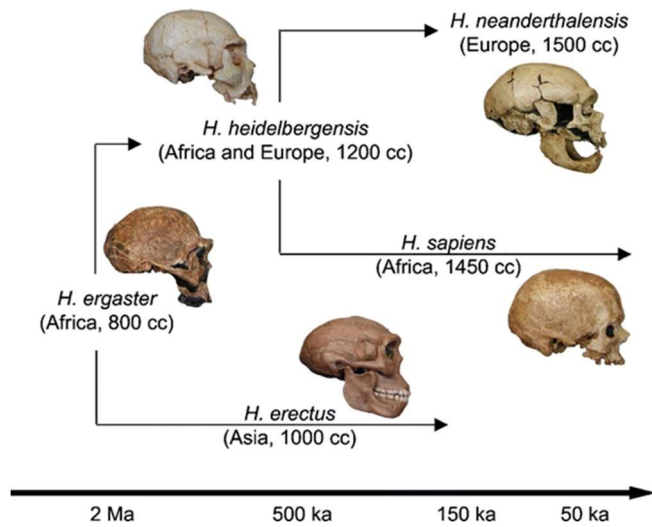


Figura 12. Gràfic on es mostra l'evolució del volum endocranial (Bruner, 2007).

En el cas dels cranis estudiats, pertanyents a *Homo sapiens* modern, el volum dels endocasts varia entre 1011 cc i 1725 cc i el volum mitjà d'aquests endocasts és 1341,1 cc. Entre els trenta cranis analitzats es pot observar un dimorfisme sexual pel que fa al volum endocranial, ja que els endocasts femenins tenen un volum mitjà de 1193 cc, mentre que en els endocasts d'individus masculins aquesta xifra ascendeix fins als 1489,2 cc. Comparant el volum dels endocasts dels cranis masculins i femenins es pot veure com hi ha quatre endocasts femenins que tenen un volum d'entre 1000 cc i 1099 cc, mentre que cap endocast masculí té aquest volum. D'igual forma, hi ha tres endocasts femenins que es troben dintre del llindar dels 1100-1199 cc i cinc endocasts també femenins amb un volum d'entre 1200 cc i 1299 cc, mentre que únicament hi ha un crani masculí en cadascun d'aquests rangs. La situació és contrària pel que fa als endocasts amb un major volum, ja que són tres els endocasts masculins amb un volum endocranial d'entre 1400 cc i 1499 cc, mentre que de femenins sols n'hi ha un. Dels quinze cranis femenins cap endocast té un volum superior als 1500 cc, però, en canvi, dels quinze masculins, huit

endocast superen aquesta xifra. L'únic llinar on hi ha el mateix nombre de cranis masculins i femenins és el que correspon a un volum de 1300-1399 cc, ja que hi ha tant dos endocasts masculins com dos femenins amb un volum dintre d'aquest llinar.

Tal com indiquen estudis com els de Milella et al., (2021) i Kimmerle et al., (2008) els cranis masculins tenen una mida cranial més gran que els femenins. En els cranis estudiats, els endocasts pertanyents a individus masculins són de major volum que els femenins. Cal puntualitzar que el volum endocranial s'ha de relativitzar, és a dir, els cranis femenins són més petits, però cal tenir present que els cossos femenins són també de menor mida. A més, no s'ha de caure en l'intent de relacionar el volum encefàlic amb la intel·ligència. Aquesta diferència de volums entre homes i dones es pot veure de forma més visual a la figura 13.

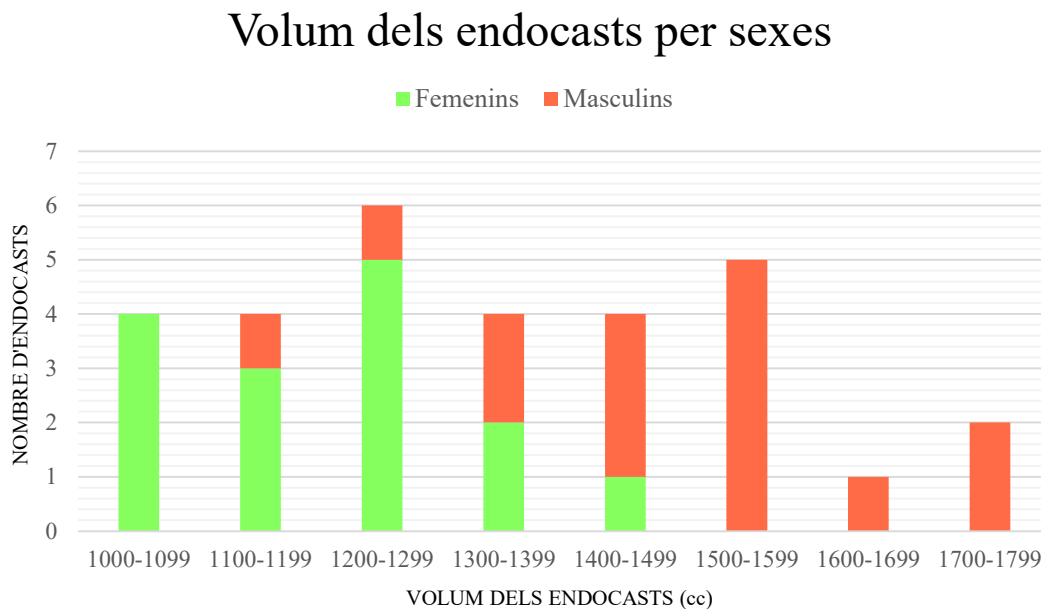


Figura 13. Es representa el volum dels endocasts dividit per rangs i amb diferenciació per sexes. Gràfic realitzat a partir de les dades obtingudes de l'anàlisi dels 30 cranis.

El crani és l'estructura de l'esquelet humà que presenta un major dimorfisme sexual després de la pelvis, però, el dimorfisme sexual no és mostra únicament en el volum endocranial, sinó que també es percep en diverses regions cranials com l'apòfisi mastoides, la regió nasal i les regions glabellar i supraciliar, estructures rellevants en el dimorfisme sexual (da Silva et al., 2023; Del Bove et al., 2023).

En els endocasts masculins hi ha un major grau de variabilitat que en els endocasts femenins. El volum de l'endocast femení més petit és de 1011 cc, mentre que el més gran té un volum de 1448 cc, per tant, el rang entre el volum més petit i el més gran és 437. En el cas dels endocasts masculins el rang és 574, ja que l'endocast més petit té un volum de 1151 cc i el de major volum se situa en els 1725 cc. L'estudi realitzat per Milella et al., (2021) amb cranis adults d'individus italians dels segles XIX i XX també afirma que en humans els mascles presenten nivells de variabilitat majors en la mida i la forma del crani en relació amb les femelles. En la nostra espècie diversos factors morfològics com el pes i l'alçada són també més variables en els homes que en les dones (Lehre et al., 2009). Cal tenir en compte que l'edat dels individus també influeix en el volum de l'endocast, però en el cas del nostre estudi, els trenta cranis de la mostra són adults, per tant, el grau de variabilitat no es veu influenciat per l'edat dels individus.

A més de la diferència de volums entre els endocasts masculins i femenins, també existeixen diferències entre el volum de cada hemisferi. A partir de l'índex d'asimetria, s'ha pogut calcular quin és l'hemisferi dominant en cada cas. En 17 dels 30 endocasts el volum de l'hemisferi esquerre és major que el del dret, és a dir l'hemisferi esquerre és el dominant. En canvi, l'hemisferi dret és dominant en 13 endocasts. El volum dels hemisferis oscil·la entre 503,899 cc i 891,466 cc, tal com es pot veure a la figura 14. L'índex d'asimetria també ens permet saber que en l'endocast femení més simètric l'hemisferi dominant és l'hemisferi esquerre, mentre que l'endocasts masculí més simètric presenta una dominància de l'hemisferi dret.

Especimen	Sexe	Volum (cc)	Petalia	Vol. hem. Esq. (cc)	Vol. hem. dret (cc)	Índex asimetria	Hemisferi dominant
ULAC_012	Male	1720	FD-OE	843,945	876,238	96,315%	Dret
ULAC_013	Female	1275	FE-OD	608,069	667,084	91,153%	Dret
ULAC_016	Male	1603	FD-OE	862,539	740,519	116,478%	Esquerre
ULAC_019	Male	1432	FD-OE	728,295	704,604	103,362%	Esquerre
ULAC_033	Male	1584	FD-OE	796,141	787,883	101,048%	Esquerre
ULAC_039	Female	1448	FE-OD	729,71	718,467	101,565%	Esquerre
ULAC_058	Male	1151	FD-OE	579,613	571,395	101,438%	Esquerre
ULAC_060	Male	1379	FD-OE	697,026	682,381	102,146%	Esquerre
ULAC_218	Female	1317	FD-OE	658,878	658,797	100,012%	Esquerre
ULAC_223	Male	1538	FD-OE	763,475	775,42	98,460%	Dret
ULAC_225	Female	1136	FE-OD	556,134	580,245	95,845%	Dret
ULAC_235	Male	1392	FD-OE	689,285	702,805	98,076%	Dret
ULAC_257	Male	1725	FD-OE	833,884	891,466	93,541%	Dret
ULAC_258	Male	1517	FD-OE	772,061	745,839	103,516%	Esquerre
ULAC_318	Female	1039	FD-OE	528,46	511,239	103,368%	Esquerre
ULAC_319	Female	1063	FD-OE	536,526	527,45	101,721%	Esquerre
ULAC_324	Female	1096	FE-OD	550,878	545,553	100,976%	Esquerre
ULAC_336	Female	1225	FE-OD	624,086	601,399	103,772%	Esquerre
ULAC_343	Female	1155	FD-OE	575,6	580,378	99,177%	Dret
ULAC_770	Female	1235	FE-OD	613,897	621,814	98,727%	Dret
ULAC_812	Male	1430	FD-OE	707,809	722,349	97,987%	Dret
ULAC_813	Male	1297	FD-OE	651,617	645,743	100,910%	Esquerre
ULAC_814	Female	1300	FD-OE	652,06	648,8	100,502%	Esquerre
ULAC_868	Female	1232	FD-OE	628,399	604,209	104,004%	Esquerre
ULAC_904	Male	1490	FD-OE	744,217	746,286	99,723%	Dret
ULAC_909	Male	1544	FE-OD	777,665	767,07	101,381%	Esquerre
ULAC_920	Female	1139	FE-OD	573,819	565,905	101,398%	Esquerre
ULAC_953	Male	1536	FE-OD	750,321	786,626	95,385%	Dret
ULAC_959	Female	1224	FD-OE	592,656	631,552	93,841%	Dret
ULAC_962	Female	1011	FD-OE	503,899	507,45	99,300%	Dret

Taula 3. Taula on es mostra el càlcul de l'índex d'asimetria i la determinació de l'hemisferi dominant.

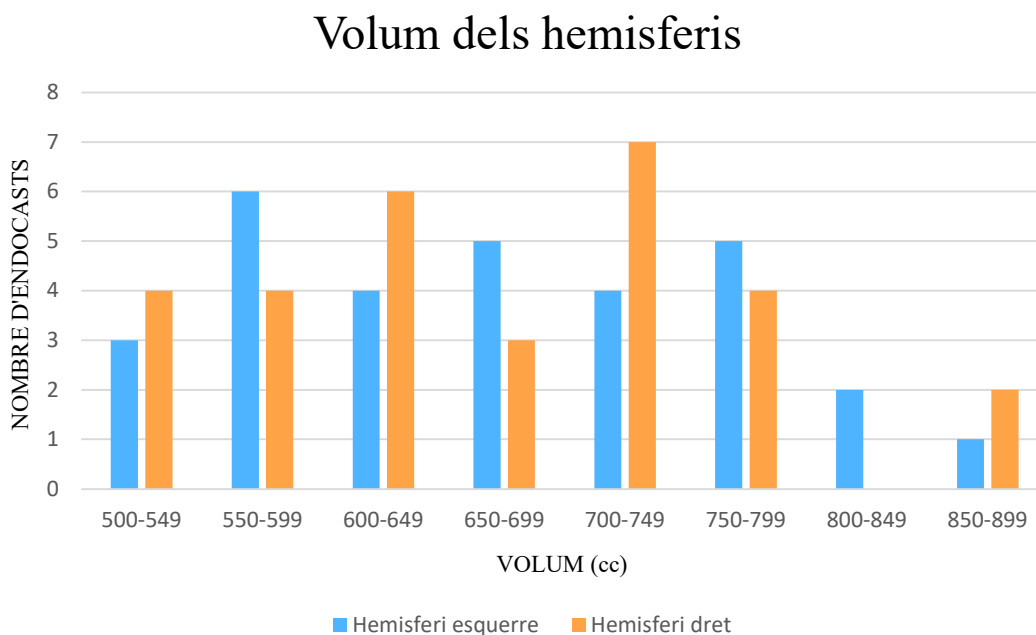
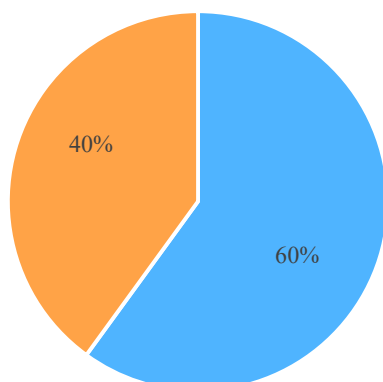


Figura 14. Es mostra el volum dels hemisferis dividit per rangs i amb diferenciació entre hemisferi dret i hemisferi esquerre. Gràfic realitzat a partir de les dades obtingudes de l'anàlisi dels 30 cranis.

Malgrat que hi ha més endocasts on l'hemisferi esquerre és més gran que el dret, el volum mitjà d'un hemisferi i de l'altre no difereix gaire, tal com ja explicava LeMay (1976: 349): “s’han observat poques diferències en els pesos dels hemisferis cerebrals de l’home modern”. El volum mitjà dels hemisferis esquerres és de 671,032 cc i el volum mitjà dels hemisferis drets és 670,565 cc. A més, a diferència del volum total dels endocasts que estaven relacionats amb el sexe, el fet que sigui l'hemisferi dret més gran o sigui major l'esquerre no té cap relació amb el sexe. Dels 17 endocasts on l'hemisferi esquerre és més gran que el dret, 9 són pertanyents a individus femenins i 8 a individus masculins, tanmateix, dels 13 endocasts amb el volum de l'hemisferi dret major, 6 són femenins i 7 masculins.

Endocasts femenins

- Domini hemisferi esquerre
- Domini hemisferi dret



Endocasts masculins

- Domini hemisferi esquerre
- Domini hemisferi dret

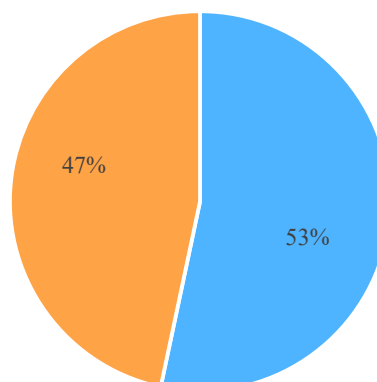


Figura 15. Es representa la proporció d'endocasts femenins amb domini de l'hemisferi esquerre i amb domini de l'hemisferi dret i la proporció d'endocasts masculins amb domini de l'hemisferi esquerre i amb domini de l'hemisferi dret. Gràfic realitzat a partir de les dades obtingudes de l'anàlisi dels 30 cranis.

7.2 Les asimetries cerebrals

En aquest treball s'ha estudiat únicament un tipus d'asimetria anatòmica, la protuberància anteroposterior dels hemisferis, també coneguda com a petalia. Dels 30 endocasts, 21 presenten una petalia frontal dreta i occipital esquerra, és a dir, el lòbul frontal dret és més

gran que el lòbul frontal esquerre i el lòbul occipital esquerre és de major mida que el lòbul occipital dret. A més de la diferència entre les dimensions, es dona també una torsió dels hemisferis, de forma que el lòbul frontal dret es desplaça cap avant i cap a l'esquerra i el lòbul occipital esquerre es desplaça cap a enrere i cap a la dreta, generant el que es coneix com torsió de Yakovlev (Aguilar-Cobeña et al., 2022; García-Tabernero, 2018). El desplaçament del lòbul frontal esquerre cap avant i cap a la dreta i un moviment del lòbul occipital dret cap enrere i cap a l'esquerra, genera una torsió inversa (Vingerhoets et al., 2018). Dintre d'aquests 21 casos, 8 pertanyen a individus femenins i 13 a masculins. La petalia frontal esquerra i occipital dreta ha sigut identificada en 9 dels 30 endocasts, sent 7 cranis femenins i 2 masculins.

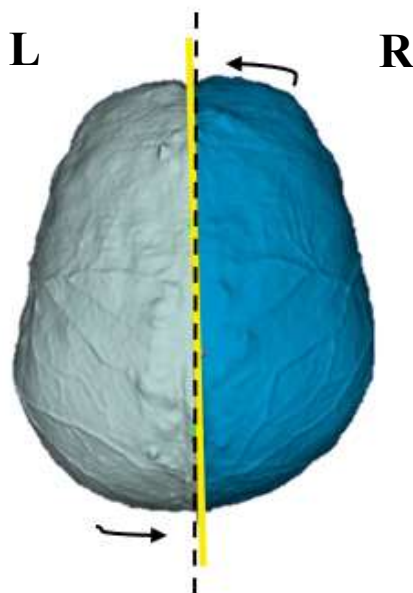


Figura 16.1

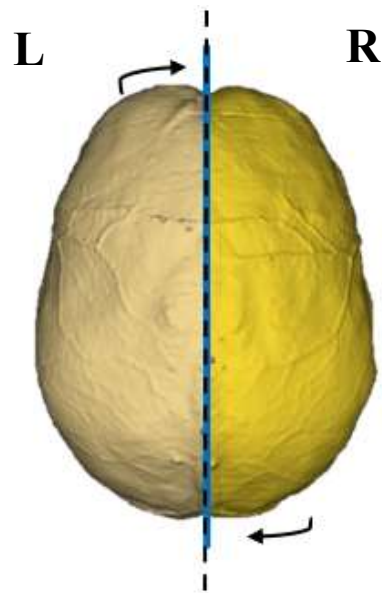


Figura 16.2

Figura 16.1. Endocast masculí que presenta una petalia frontal dreta i occipital esquerra i on es mostra la torsió de Yakovlev (línia groga). Imatge de l'endocast generat a partir del crani ULAC_258.

Figura 16.2. Endocast femení que presenta una petalia frontal esquerra i occipital dreta. Imatge de l'endocast generat a partir del crani ULAC_920.

Tant en el cas dels cranis masculins com femenins hi ha un major nombre de cranis que presenten la petalia frontal dreta i occipital esquerra. Tal com confirmen estudis realitzats amb un major nombre de població, aquesta és la petalia predominant en la majoria d'humans (Chui & Damasio, 1980; Kertesz et al., 1986, 1990; LeMay, 1976; LeMay &

Kido, 1978; Toga & Thompson, 2003). En el cas dels endocasts masculins existeix una major diferència entre els que presenten aquesta petalia i els que presenten la petalia frontal esquerra i occipital dreta. En el cas dels cranis femenins, malgrat que el nombre d'endocasts que presenten la petalia frontal dreta i occipital esquerra és major, hi ha més igualtat entre el nombre de cranis que presenten un tipus de petalia i l'altra. Tal com mostren les dades i es pot veure a la figura 17, no existeix cap relació entre el sexe i les asimetries cerebrals, però sí que cal dir que les asimetries són més perceptibles en els cranis més grans, majoritàriament masculins, mentre que els cranis femenins, al ser de menor mida, presenten una major dificultat d'identificació de petalies. A més, la petalia frontal dreta i occipital esquerra està més marcada en els endocasts que la petalia frontal esquerra i occipital dreta i, per tant, és més fàcil d'identificar.

Malgrat que les petalies són més visibles quan el volum de l'endocast és major, les petalies no estan relacionades amb el volum de cada hemisferi, és a dir, el major volum d'un determinat hemisferi no determina el tipus de petalia present en l'endocast, tal com es mostra en la figura 18.

Tipus de petalies presents en els endocasts

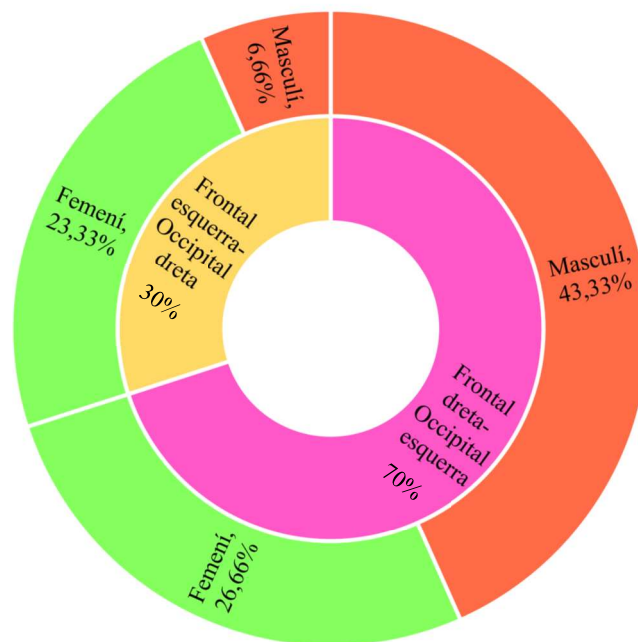


Figura 17. S'indica la proporció d'endocasts amb cada tipus de petalia i es relaciona amb el sexe. Gràfic realitzat a partir de les dades obtingudes de l'anàlisi dels 30 cranis.

Tipus de petalies presents en els endocasts

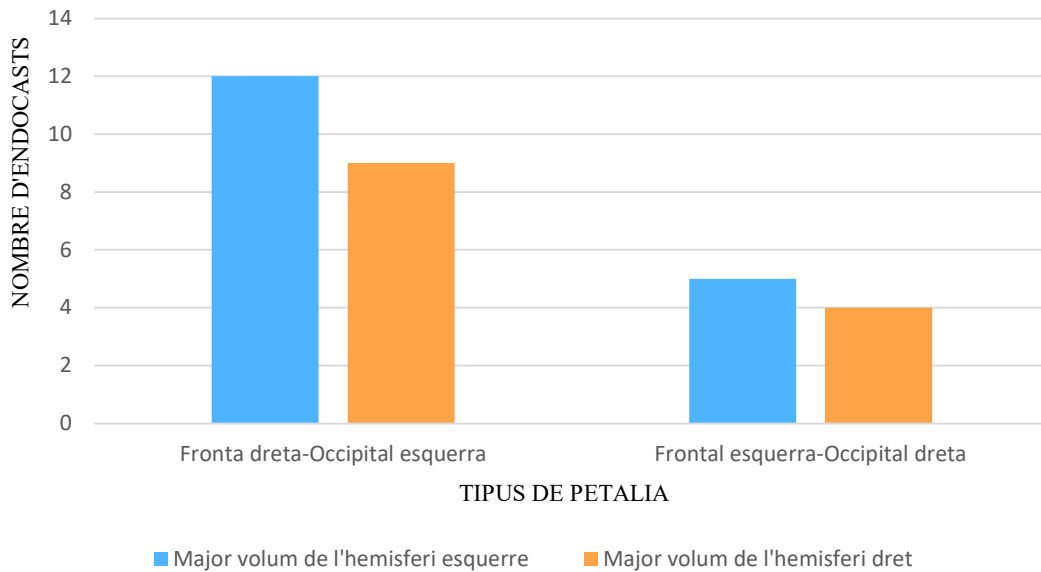


Figura 18. Es representen els endocasts amb cada tipus de petalia i es relaciona amb l'hemisferi de major volum. Gràfic realitzat a partir de les dades obtingudes de l'anàlisi dels 30 cranis.

7.3 Les asimetries cerebrals en hominins i primats no humans

Les petalies són només un tipus d'asimetries cerebrals anatòmiques, ja que existeixen altres com la grandària i la forma general dels dos hemisferis, els patrons girals/sulcals, les distàncies de longitud, amplitud i altura i una varietat d'estructures regionals de substància grisa i blanca (Aguilar-Cobeña et al., 2022). Però, el cervell no és l'únic òrgan asimètric, sinó que hi ha asimetries en molts altres òrgans. Aquesta asimetria esquerra-dreta dels òrgans interns i del sistema nerviós central és una característica distintiva i essencial del cos dels vertebrats (Mercola & Levin, 2001). En el cas dels humans, el pulmó esquerre comprimit pel cor és més petit i té solament dos lòbuls, a diferència del pulmó dret que és més gran i té 3 lòbuls. Contràriament, el ronyó esquerre és més gran que el dret i habitualment està una mica més amunt. El fetge, l'òrgan més gran de l'abdomen, està en el costat dret, igual que la vesícula biliar, i a l'altre costat està la melsa, molt més petita. Aquests són simplement alguns exemples que mostren l'asimetria present en tot el cos. Cal dir que existeixen algunes estructures simètriques com el recte, l'anus, la boca, la gola i l'esòfag (McManus, 2002).

Entre les asimetries cerebrals més comunes destaquen la fissura de Silvio esquerra, la qual és més llarga que la dreta, on l'extrem posterior de la fissura de Silvio dreta sol ser més alt que l'esquerre i el pla temporal esquerre que sol ser més llarg que el dret. A més,

l'escorça insular anterior és major en l'hemisferi dret i l'extrem posterior del si sagital sol trobar-se a la dreta de la línia mitjana i el si flueix més directament cap al si transvers dret, el qual sol estar més alt que l'esquerre (LeMay, 1976; Watkins et al., 2001; Westbury et al., 1999).

Com ja s'ha presentat, dels 30 cranis de l'estudi, 21 presenten una asimetria frontal dreta i occipital esquerra i 9 una asimetria frontal esquerra i occipital dreta, és a dir, el 70% de la mostra presenta la petalia frontal dreta i occipital esquerra. La major part de la població presenta la petalia frontal dreta i occipital esquerra (Chui & Damasio, 1980; Kertesz et al., 1986, 1990; LeMay, 1976; LeMay & Kido, 1978; Toga & Thompson, 2003), però, des de quan existeix la predominança d'aquest tipus d'asimetria?

En la majoria de hominins fòssils les asimetries cerebrals són similars a les dels humans moderns i presenten majoritàriament la petalia frontal dreta i occipital esquerra. Dels 6 cranis d'australopitecs i de parantrops estudiats per Holloway i De La Costelareymondie (1982) (SK1585, SK859, MLD1, OMO338y, STS60, OH5), malgrat que la majoria són incomplets, s'ha pogut determinar la petalia frontal dreta i occipital esquerra (Holloway & De La Costelareymondie, 1982). Per exemple, en el cas de l'endocast de OH5 (Suwa et al., 1997), pertanyent a un *Paranthropus boisei*, existeix una petalia frontal dreta, ja que el pol frontal dret es projecta més cap avant. Pel que fa a la zona occipital, la reconstrucció del crani dificulta la determinació de la petalia occipital, però es considera que el pol occipital esquerre és lleugerament més posterior. En el cas de l'endocast de l'*Australopithecus africanus* STS60 (Broom & Schepers, 1946) simplement es compta amb la regió frontal, la qual mostra una petalia frontal dreta, mentre que en el cas del *Paranthropus robustus* SK1585 (Holloway, 1972), són les regions frontals del crani les que manquen (Holloway & De La Costelareymondie, 1982).

Cal destacar el crani KNM-ER 1813 (Ferguson, 1987), pertanyent a *Homo habilis*, el qual presenta una petalia frontal esquerra i occipital dreta (Poza-Rey et al., 2017), mentre que l'endocast del crani masculí OH 16 (Leakey & Leakey, 1964) suggereix una petalia frontal dreta i occipital esquerra (Tobias, 1987). Els cranis d'aquesta espècie mostren una major diversitat de petalies com es pot veure en els individus OH 13, OH 24 i KNM-ER 1813 (Tobias, 1987).

Els primers estudis realitzats amb *Homo erectus* van determinar que quatre dels cinc cranis estudiats exhibien el patró de petalia frontal dreta i occipital esquerra (Holloway,

1980). Posteriorment, un nou estudi, una revaluació dels cranis i dels endocasts i la introducció d'un nou crani, va fer que d'un total de sis cranis (Trinil 2, Sangiran 2, Sangiran 4, Sangiran 10, Sangiran 12, Sangiran 17), cinc presentessin aquesta petalia (Holloway, 1981). En el crani Sangiran 17 no s'ha identificat cap petalia degut al seu estat de conservació que genera una gran dificultat a l'hora de determinar la petalia que presenta. Els estudis realitzats per Holloway i De La Costelareymondie (1982) a partir de 20 cranis (OH9, I, II, VI, VII, VIII, KNM-ER3733, 3883, Choukoutien 111, L, E, L, de Sale, Solo I, IV, V, VI, IX, X i XI) també mostren una predominança de la petalia frontal dreta i occipital esquerra, ja que en 11 dels 20 cranis s'ha pogut identificar aquesta petalia. Un altre cas en què s'ha descrit una petalia frontal esquerra i occipital dreta és el crani femení d'*Homo floresiensis* LB1 (Brown et al., 2004; Falk et al., 2005).

Pel que fa als *Homo neanderthalensis*, 7 dels 10 cranis estudiats Holloway i De La Costelareymondie (1982) (Spy I i II, la Quina, Gib. I, Gib. II, La Chapelle-aux-Saints, La ferrassie, Djebel Ihroud I, Rhodesian, Swanscombe, Neandertal cap.) presenten una petalia frontal dreta i occipital esquerra. També presenta aquesta petalia el crani Saccopastore 1 (SCP1) (Sergi, 1929), un crani femení en bon estat de conservació (Bruner & Manzi, 2008). La petalia frontal esquerra i occipital dreta, pròpia dels esquerrans, està present en els neandertals de La Chapelle-aux-Saints (LeMay, 1977; Poza-Rey et al., 2017).

Una investigació realitzada per Poza-Rey et al (2019), on s'inclouen 16 endocasts complets d'hominins europeus del Plistocè mitjà de la Sima de los Huesos (Atapuerca), indica que les petalies d'aquests individus són molt variables, ja que la petalia occipital esquerra és predominant en 7 de 9 endocasts on es pot avaluar aquesta petalia, però no sempre presenta associació amb una petalia frontal dreta.

Pel que fa als primats no humans, els estudis realitzats mitjançant endomotlles i imatges de ressonància magnètica (Holloway & De La Costelareymondie, 1982; Phillips & Sherwood, 2007; Pilcher et al., 2001) han mostrat que existeixen diferències significatives entre les petalies que presenten els diferents taxons de grans simis. *Gorilla gorilla* presenta una clara preponderància de petalies occipitals esqueres a comparació amb *Pan paniscus*, *Pan troglodytes* i *Pongo pigmaeus*. La petalia frontal dreta i occipital esquerra es dona en 13 dels 40 *Gorilla gorilla*, xifra semblant a la dels *Pan paniscus*, on 14 de 41 presenten aquesta petlaia. La xifra és molt menor en el cas dels *Pan troglodytes* i *Pongo pigmaeus*, els quals únicament mostren aquesta petalia 4 de 34 i 3 de 20, respectivament

(Holloway & De La Costelareymondie, 1982; LeMay, 1976). Aquestes dades indiquen que en tots els casos s'han identificat un major nombre de petalies frontal esquerra i occipital dreta, és a dir, en els grans simis la petalia amb major freqüència és la contrària a la dels *Homo sapiens*. Els estudis de LeMay (1976) van determinar que en els grans simis la petalia occipital dreta era més freqüent que l'esquerra, però, en canvi, en els ximpanzés els pols occipitals esquerres són més amples que els drets. Altres estudis (Hopkins & Marino, 2000; Pilcher et al., 2001) contradiuen els estudis de Holloway i De La Costelareymondie (1982) i confirmen que els grans simis presenten una petalia frontal dreta i occipital esquerra, és a dir, igual que els humans moderns.

Pel que fa als micos del Vell i Nou Món com els papions, els macaca, els presbytis, els alouatta o els ateles, alguns estudis realitzats han determinat que existeix una protrusió a l'occipital esquerra i cap protrusió frontal (LeMay, 1976), mentre que d'altres, a partir de monos rhesus, sols han identificat la petalia frontal dreta (Falk et al., 1990). Cheverud et al. (1990) van informar que en els monos rhesus es dona una petalia frontal dreta i occipital esquerra. Per una altra banda, els estudis de Phillips i Sherwood (2007) mostren que els *Cebus apella* presenten petalies frontals esquerres i cap mena de petalies occipitals i altres (Hopkins & Marino, 2000; Pilcher et al., 2001) no han revelat cap asimetria significativa entre aquests primats. La diversitat d'estudis i de resultats és deguda a l'ús de diferents metodologies per tal d'identificar les petalies, juntament amb la petita grandària dels cervells d'aquestes espècies.

La petalia frontal dreta i occipital esquerra, típica en els *Homo sapiens* com s'ha demostrat en la investigació presentada en aquest treball i com també mostra Holloway i De La Costelareymondie (1982) on 11 dels 14 cranis analitzats presenten aquesta petalia, es torna cada cop més freqüent al llarg de l'evolució del gènere *Homo* (De Sousa & Cunha, 2012).

7.4 Les asimetries cerebrals i la lateralització manual

Les petalies descrites en aquest treball, juntament amb altres asimetries anatòmiques cerebrals, comporten i són producte, en els humans, de la lateralització cerebral, és a dir, de l'existència de diferències funcionals entre els dos hemisferis.

Malgrat que existeixen alguns estudis (Chui & Damasio, 1980; Faglioni & Scarpa, 1989; Good et al., 2001; Hervé et al., 2006; Steele, 2000; Watkins et al., 2001) que neguen la

relació entre les petalies i la lateralitat manual, altres han demostrat que l'existència de la petalia frontal dreta i occipital esquerra està associada a les persones dretanes (Cashmore et al., 2008; Holloway & De La Costelareymondie, 1982; Kertesz et al., 1986; LeMay, 1976; LeMay & Kido, 1978; Watkins et al., 2001), mentre que en les persones esquerranes, predomina la petalia frontal esquerra i occipital dreta, malgrat que també es dona la petalia contrària (Galaburda et al., 1978).

Els estudis que contradiuen aquesta relació com el de Chui & Damasio (1980) determinen que la preferència d'una mà sobre l'altra i les petalies són dues variables independents i afirmen que no hi ha diferències significatives entre els cervells de les persones destres i esquerranes. A partir dels estudis de morfometria d'asimetries estructurals basats en vòxels tampoc s'ha confirmat la relació entre la lateralitat i les asimetries cerebrals (Good et al., 2001; Hervé et al., 2006; Watkins et al., 2001), mentre que les investigacions de Faglioni i Scarpa (1989) i Steele (2000) han conclòs que existeix una dèbil associació entre aquests dos factors.

Considerant que sí que existeix una relació entre les petalies i la lateralitat manual, en els individus destres es troba, en la majoria dels casos, la petalia frontal dreta i occipital esquerra, mentre que les persones esquerranes tendeixen a presentar cervells més simètrics on les petalies són menys marcades i s'identifiquen els dos tipus de petalies, tant la frontal esquerra i occipital dreta com la petalia frontal dreta i occipital esquerra, sent aquesta menys freqüent que en les persones destres. La petalia occipital esquerra és de major mida i sobresurt més en les persones destres que en les esquerranes (LeMay, 1992; McRae et al., 1968; Zilles et al., 1996).

La relació entre les asimetries cerebrals, la lateralitat manual i el domini del llenguatge és més complexa. Broca (Broca, 1861) va postular que en les persones destres les regions lingüístiques es situaven en l'hemisferi esquerre, ja que era en aquest hemisferi on hi havia un major desenvolupament de l'àrea de Broca, àrea conformada per l'àrea 44 i 45 de Brodmann, on es troba la dominància del llenguatge (Knecht et al., 2000). A partir d'aquesta afirmació es va deduir que en les persones esquerranes seria l'hemisferi dret on es trobaria aquesta regió (Harris, 1991). Però aquesta associació no es dona de forma universal, ja que l'afàsia, trastorn que afecta a l'expressió i comprensió de les paraules, també es desenvolupa en les persones esquerranes a partir d'una lesió en l'hemisferi esquerre (Luria, 1976).

Un estudi realitzat a partir de 188 persones sanes i emprant l'ecografia Doppler transcranial funcional ha permès mesurar la lateralització del llenguatge (Knecht et al., 1998, 2000). Knecht et al. (2000) determinen que, en general, les persones esquerranes fortes mostren una incidència gairebé set vegades major de domini del llenguatge en l'hemisferi dret que les destres fortes. La incidència de domini del llenguatge en l'hemisferi dret és del 27% en les persones extremadament esquerranes, mentre que en les extremadament destres és del 4%. És a dir, ser esquerrà augmenta la probabilitat que predomini el llenguatge en l'hemisferi dret, però no és una condició prèvia ni una conseqüència necessària.

Les asimetries cerebrals estan també relacionades amb la capacitat de distingir dreta i esquerra, ja que les persones amb cervells més asimètrics distingeixen millor la dreta i l'esquerra que les persones amb cervells més simètrics, de forma que les persones marcadament destres o esquerranes són millors fent aquesta distinció (McManus, 2002).

Entre el 85 i 90% de la població (Amunts et al., 2000; Cashmore et al., 2008; Chui & Damasio, 1980; Papadatou-Pastou, 2011) és destra, mentre que els esquerrans representen al voltant d'un 10% de la població (Amunts et al., 2000; Cavill & Bryden, 2003; Holtzen, 1994) i entre l'1-5% són persones ambidextres (Crow et al., 1998; Rodriguez et al., 2010). Gilbert & Wysocki (1992) i Mazoyer et al., (2014) han confirmat que almenys en el 85% de les persones el domini del llenguatge es troba en l'hemisferi esquerre, és a dir, un percentatge semblant al de les persones destres. La lateralització dreta per al llenguatge, sols s'ha trobat en persones esquerranes, en concret en un 7%, i l'absència de lateralitat s'ha descrit en el 12% de les persones destres i el 15% d'esquerranes (Aguilar-Cobeña et al., 2022).

8. DISCUSSIÓ

A partir de les dades obtingudes en la investigació presentada en aquest treball i la informació proporcionada per altres investigacions tractarem d'analitzar les relacions entre les diverses variables i respondre a les preguntes plantejades a l'inici d'aquest treball. L'objectiu principal d'aquesta investigació era identificar si hi ha diferència de volums entre ambdós hemisferis, quines asimetries es poden descriure en els endocasts creats a partir dels cranis proporcionats per NESPOS, si existeix relació entre les asimetries observades i el sexe i quina relació existeix entre aquestes asimetries i la lateralitat manual.

Els cervells humans són asimètrics i aquesta asimetria, a més de ser visible en les asimetries anatòmiques de determinades regions o estructures cerebrals, també es fa palesa en el volum dels hemisferis. Davant la visió d'un cervell simètric i amb dos hemisferis iguals, en aquest treball s'ha demostrat que els hemisferis tenen volums diferents. Respecte a les asimetries cerebrals, s'han identificat petalies frontals i occipitals, sent la petalia frontal dreta i occipital esquerra la més freqüent. Existeixen altres tipus d'asimetries cerebrals, però són més difícils d'observar en endocasts i, a més, la magnitud de l'estudi no permetia abastar totes les petalies presents, com a conseqüència ens vam haver de centrar en un tipus concret d'asimetries, les petalies.

Tal com s'ha presentat al llarg del treball, el volum total dels endocranis està relacionat amb el sexe, ja que els cranis femenins són més petits i, per tant, el volum de l'endocast també és de menor mida que en els cranis pertanyents a individus masculins. Però, pel que fa al volum de cada hemisferi, aquest no està relacionat amb el sexe, és a dir, el sexe no determina quin hemisferi serà el dominant, aquestes són dues variables que no estan relacionades. Tampoc hi ha cap relació entre el sexe i la petalia presentada en cada endocast, de forma que únicament el volum total de l'endocast està relacionat amb el sexe.

El volum total, igual que el sexe dels cranis, no està relacionat amb els volums dels hemisferis ni amb les petalies descrites, en altres paraules, un major o menor volum de l'endocasts no determina l'hemisferi de major volum, és a dir, l'hemisferi dominant, ni la petalia present. Cal destacar que els endocasts més petits, els quals solen ser femenins, tenen unes petalies menys marcades, mentre que els de major volum, majoritàriament

pertanyents a individus masculins, mostren unes petalies més marcades. Per aquest motiu, els endocasts femenins presenten majors dificultats a l'hora d'identificar les petalies.

Dos aspectes entre els quals tampoc hi ha cap relació és entre les petalies i l'hemisferi dominant, ja que presentar una determinada petalia no implica un major volum d'un hemisferi concret, ni a la inversa, és a dir, el major volum de l'hemisferi dret o esquerre tampoc determina un tipus de petalia concreta. Pel que fa a l'origen dels cranis, aquest no és determinant en el volum dels endocranis, ni en el volum dels hemisferis, ni en les petalies descrites.

Les asimetries cerebrals estan relacionades amb la lateralització manual tal com han confirmat diverses investigacions (Cashmore et al., 2008; Holloway & De La Costelareymondie, 1982; Kertesz et al., 1986; LeMay, 1976; LeMay & Kido, 1978; Watkins et al., 2001), relacionant la petalia frontal dreta i occipital esquerra com a pròpia de les persones destres. Com ja hem presentat, en el cas de les persones esquerranes es poden donar els dos tipus de petalies. Cal tenir present que en aquest aspecte hi ha certa controvèrsia, ja que hi ha estudis que neguen la relació entre les asimetries cerebrals i la lateralitat manual (Chui & Damasio, 1980; Faglioni & Scarpa, 1989; Good et al., 2001; Hervé et al., 2006; Steele, 2000; Watkins et al., 2001).

Considerant que la mostra que hem analitzat compta amb 30 cranis humans i que segons els estudis d'Amunts et al. (2000), Cashmore et al. (2008), Chui i Damasio (1980), Papadatou-Pastou (2011) hi ha entre un 85 i 90% de persones destres en la població, podem inferir que dels 30 individus, entre 25 i 27 seran destres; 3 seran esquerrans, ja que representen el 10% de la població (Amunts et al., 2000; Cavill & Bryden, 2003; Holtzen, 1994), i si les persones ambidextres són entre un 1% i un 5% (Crow et al., 1998; Rodríguez et al., 2010), com a màxim hi haurà una persona ambidextra. A més, 25 dels 30 individus tindrien el llenguatge en l'hemisferi esquerre, ja que açò es dona en almenys el 85% de les persones (Gilbert & Wysocki, 1992; Mazoyer et al., 2014), mentre que si la lateralització dreta per al llenguatge s'ha descrit en un 7% de la població i únicament en esquerranes (Aguilar-Cobeña et al., 2022), 2 individus serien esquerrans i tindrien el domini del llenguatge en l'hemisferi dret.

La determinació de petalies realitzada en aquest treball indica que 21 cranis presenten la petalia frontal dreta i occipital esquerra i 9 la petalia frontal esquerra i occipital dreta, és a dir dels 30 individus com a mínim 9 serien esquerrans, però aquesta xifra podria

augmentar perquè els esquerrans també poden presentar la petalia frontal dreta i occipital esquerra, per tant, dels 21 endocasts on s'ha identificat aquesta petalia alguns podrien pertànyer a individus esquerrans. Com a conseqüència, com a màxim hi hauria 21 persones destres. La diferència que hi ha en les dades és deguda al fet que la mostra que s'ha estudiat és petita a comparació dels estudis d'Aguilar-Cobeña et al. (2022), Amunts et al. (2000), Mazoyer et al. (2014) i Rodríguez et al. (2010) realitzats amb un gran nombre de població.

Cal recalcar que en la revisió bibliogràfica realitzada per tal de conèixer quines petalies es troben en la resta d'espècies d'hominins i primats no humans s'ha pogut confirmar que els hominins mostren petalies semblants a les dels *Homo sapiens*, amb una major freqüència de la petalia frontal dreta i occipital esquerra, mentre que els primats no humans presenten diferències entre els tàxons de pòngids pel que fa a les petalies i aquestes solen ser diferents de les descrites en els hominins (Holloway & De La Costelareymondie, 1982). És a dir, els primats no humans presenten lateralització, però no una lateralització dominant com es produeix en el cas dels humans.

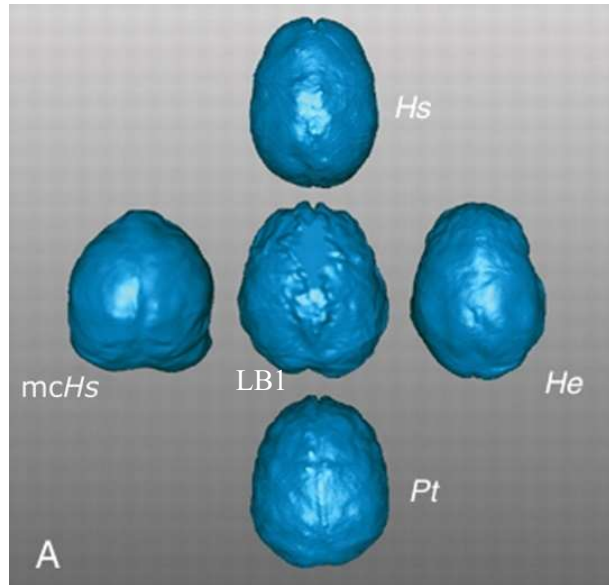


Figura 19. Comparativa d'endocasts. LB1 (*Homo floresiensis*), Hs (*Homo sapiens*), Pt (*Pan troglodytes*), mcHs (*Homo sapiens* amb microcefàlia), He (*Homo erectus*) (Falk et al, 2005).

A més, dels objectius concrets de la nostra cerca, aquest treball pretén contribuir al coneixement del cervell i aportar informació dels endocasts actuals per tal de poder realitzar comparacions amb endocasts d'espècies passades. L'estudi es podria ampliar en un futur segmentant i estudiant més cranis, estudiant altres asimetries anatòmiques i incloent individus infantils, per tractar de saber si l'edat és un factor rellevant en el desenvolupament del volum endocranial, del volum dels hemisferis i de les petalies. Respecte a la relació entre les petalies i la lateralitat manual, els resultats d'aquest treball es podrien relacionar amb estudis com el de Poza-Rey (Poza-Rey et al., 2017), on s'estudia la lateralitat d'un grup d'individus de la Sima de los Huesos (Atapuerca) unint els resultats de l'estudi dels endocasts de 17 cranis de preneandertals i els resultats de la

determinació de la lateralitat a partir d'estriacions labials en la dentició anterior (Lozano et al., 2009). En total, de les 12 assignacions que es van poder realitzar, 5 individus han sigut considerats destres i 7 no destres, cosa indica que la proporció d'individus destres i no destres varia entre aquesta població i els humans moderns.

9. CONCLUSIÓ

En aquest treball s'ha tractat de descriure les petalies presents en una mostra de 30 cranis humans a partir de l'anàlisi dels seus endocranis i de conèixer les relacions d'aquestes asimetries amb la lateralitat manual. Igualment, s'ha estudiat la relació entre el sexe i el volum dels endocasts i la diferència de volums entre cada hemisferi. L'ús de les tècniques de l'antropologia virtual, la possibilitat de segmentar i estudiar els endocasts en un entorn virtual i l'ús de programaris com 3d Slicer han permès obtenir dades precises i no provocar cap dany als cranis.

El grup de 30 *Homo sapiens* adults estudiat en aquest treball i proporcionats pel repositori NESPOS (Pleistocene People and Places) que gestiona el Neanderthal Museum, presenta un patró de petalies propi d'aquesta espècie, ja que és la petalia frontal dreta i occipital esquerra la que predomina per sobre de la petalia frontal esquerra i occipital dreta. El volum dels endocasts es troba també dintre del llindar descrit en humans i s'identifica una diferència entre el volum de cada hemisferi. Les relacions que s'han pogut confirmar són:

-hi ha relació entre el volum de l'endocast i el sexe,

-hi ha relació entre les petalies i la lateralitat manual.

En canvi, no existeix cap relació entre les següents variables:

-no hi ha relació entre el sexe i l'hemisferi dominant,

-no hi ha relació entre el sexe i les petalies,

-no hi ha relació entre el volum de l'endocast i l'hemisferi dominant,

-no hi ha relació entre el volum de l'endocast i les petalies,

-no hi ha relació entre l'hemisferi dominant i les petalies,

-l'origen tampoc és un factor determinant en cap aspecte.

Malgrat les contradiccions existents a l'hora de determinar les petalies d'altres espècies, es pot afirmar que els hominins mostren petalies similars a les dels humans moderns amb una predominança de la petalia frontal dreta i occipital esquerra, metre que en el cas dels primats no humans hi ha una major diversitat de petalies i, per tant, no es dona el mateix patró de petalies, sent a més, cervells més simètrics que els cervells humans.

L'antropologia virtual i els estudis paleoneuròlogics ens ha permès conèixer determinats aspectes del cervell humà, un òrgan encara molt desconegut i amb moltes preguntes per respondre, allunyant-nos de la idea d'un cervell simètric, explorar la lateralitat manual i donar una ullada a les petalies cerebrals d'altres espècies per saber més sobre com és el nostre cervell i quina és la seva estructura.

10. BIBLIOGRAFIA

- Aguilar-Cobeña, F., Moreira-Cantos, V., & Guillín-Villagran, K. (2022). Asimetrías Cerebrales. *Revista Estudiantil CEUS (Ciencia Estudiantil Unidad de Salud)*, 4(1), 1–6. <https://ceus.ucacue.edu.ec/index.php/ceus/article/view/70>
- Acadèmia Valenciana de la Llengua (s.d.) “Virtual”. In. *Diccionari Normatiu Valencià*. Consultat: 10 de maig de 2024
- Amunts, K., Jäncke, L., Mohlberg, H., Steinmetz, H., & Zilles, K. (2000). Interhemispheric asymmetry of the human motor cortex related to handedness and gender. *Neuropsychologia*, 38(3), 304–312. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(99\)00075-5](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(99)00075-5)
- Begun, D., & Walker, A. (1993). The endocast. In A. Walker & R. Leakey (Eds.), *The Nariokotome. Homo erectus Skeleton* (pp. 330–348). Harvard University Press.
- Bhattacharyya, K. (2016). Godfrey Newbold Hounsfield (1919–2004): The man who revolutionized neuroimaging. *Annals of Indian Academy of Neurology*, 19(4), 448. <https://doi.org/10.4103/0972-2327.194414>
- Bishop, D. V. M. (2013). Cerebral asymmetry and language development: cause, correlate or consequence? *Science (New York, N.Y.)*, 340(6138), 1230531. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1230531>
- Bottari, A., Cicero, G., Silipigni, S., Stagno, A., Catanzariti, F., Cinquegrani, A., & Ascenti, G. (2021). CT Scan. *Anatomy for Urologic Surgeons in the Digital Era: Scanning, Modelling and 3D Printing*, 89–98. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59479-4_7
- Broca, P. (1861). Sur le siège de la faculté du langage articulé. *Bulletins et Mémoires de La Société d'Anthropologie de Paris*, 6(1), 377–393. <https://doi.org/10.3406/BMSAP.1865.9495>
- Broom, R., & Schepers, G. W. H. (1946). *The South African Fossil Ape-Men: the Australopithecinae. Transvaal Museum Memoir* (Vol. 2). Transvaal Museum.
- Brown, P., Sutikna, T., Morwood, M. J., Soejono, R. P., Jatmiko, Saptomo, E. W., & Due, R. A. (2004). A new small-bodied hominin from the Late Pleistocene of Flores, Indonesia. *Nature* 2004 431:7012, 431(7012), 1055–1061. <https://doi.org/10.1038/NATURE02999>
- Bruner, E. (2004). Geometric morphometrics and paleoneurology: brain shape evolution in the genus Homo. *Journal of Human Evolution*, 47(5), 279–303. <https://doi.org/10.1016/J.JHEVOL.2004.03.009>
- Bruner, E. (2007). Cranial shape and size variation in human evolution: Structural and functional perspectives. *Child's Nervous System*, 23(12), 1357–1365. <https://doi.org/10.1007/S00381-007-0434-2/METRICS>
- Bruner, E. (2012). La evolución cerebral de los homínidos. *Investigación y Ciencia*, 425, 68–76. <https://cir.cenieh.es/handle/20.500.12136/663>

- Bruner, E. (2015). *Human Paleoneurology* (E. Bruner, Ed.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08500-5>
- Bruner, E. (2020). The Fossil Evidence of Human Brain Evolution. *Evolutionary Neuroscience*, 769–802. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820584-6.00032-5>
- Bruner, E. (2021). Evolving Human Brains: Paleoneurology and the Fate of Middle Pleistocene. *Journal of Archaeological Method and Theory* 28:1, 28(1), 76–94. <https://doi.org/10.1007/S10816-020-09500-8>
- Bruner, E., & Manzi, G. (2008). Paleoneurology of an “early” Neandertal: endocranial size, shape, and features of Saccopastore 1. *Journal of Human Evolution*, 54(6), 729–742. <https://doi.org/10.1016/J.JHEVOL.2007.08.014>
- Cashmore, L., Uomini, N., & Chapelain, A. (2008). The evolution of handedness in humans and great apes: a review and current issues. *Journal of Anthropological Sciences*, 86, 7–35.
- Cavill, S., & Bryden, P. (2003). Development of handedness: Comparison of questionnaire and performance-based measures of preference. *Brain and Cognition*, 53(2), 149–151. [https://doi.org/10.1016/S0278-2626\(03\)00098-8](https://doi.org/10.1016/S0278-2626(03)00098-8)
- Chance, S. A., & Crow, T. J. (2007). Distinctively human: cerebral lateralisation and language in Homo sapiens. *Journal of Anthropological Sciences*, 85, 83–100.
- Cheverud, J. M., Falk, D., Hildebolt, C., Moore, A. J., Helmkamp, R. C., & Vannier, M. (1990). Heritability and Association of Cortical Petalías in Rhesus Macaques (*Macaca mulatta*). *Brain Behavior and Evolution*, 35(6), 368–372. <https://doi.org/10.1159/000115881>
- Chui, C. H., & Damasio, A. R. (1980). Human cerebral asymmetries evaluated by computed tomography. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 43(10), 873–878. <https://doi.org/10.1136/JNNP.43.10.873>
- Conroy, G. C., Jolly, C. J., Cramer, D., & Kalb, J. E. (1978). Newly discovered fossil hominid skull from the Afar depression, Ethiopia. *Nature* 1978 276:5683, 276(5683), 67–70. <https://doi.org/10.1038/276067A0>
- Conroy, G. C., & Vannier, M. W. (1984). Noninvasive Three-Dimensional Computer Imaging of Matrix-Filled Fossil Skulls by High-Resolution Computed Tomography. *Science*, 226(4673), 456–458. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.226.4673.456>
- Conroy, G. C., & Vannier, M. W. (1987). Dental development of the Taung skull from computerized tomography. *Nature* 1987 329:6140, 329(6140), 625–627. <https://doi.org/10.1038/329625A0>
- Conroy, G. C., Vannier, M. W., & Tobias, P. V. (1990). Endocranial Features of *Australopithecus africanus* Revealed by 2- and 3-D Computed Tomography. *Science*, 247(4944), 838–841. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.2305255>
- Conroy, G. C., Weber, G. W., Seidler, H., Recheis, W., Zur Nedden, D., Jara, A., & Mariam, H. (2000). Endocranial Capacity of the Bodo Cranium Determined From

- Three-Dimensional Computed Tomography. *Phys Anthropol*, 113, 111–118. <https://doi.org/10.1002/1096-8644>
- Conroy, G. C., Weber, G. W., Seidler, H., Tobias, P. V., Kane, A., & Brunnsden, B. (1998). Endocranial capacity in an early hominid cranium from Sterkfontein, South Africa. *Science*, 280(5370), 1730–1731. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.280.5370.1730/ASSET/8299ABF5-7C26-4337-ABDF-AE6E7256C9D1/ASSETS/GRAPHIC/SE2486579003.JPEG>
- Corballis, M. C. (2019). Evolution of cerebral asymmetry. *Progress in Brain Research*, 250, 153–178. <https://doi.org/10.1016/BS.PBR.2019.04.041>
- Crow, T. J., Crow, L. R., Done, D. J., & Leask, S. (1998). Relative hand skill predicts academic ability: global deficits at the point of hemispheric indecision. *Neuropsychologia*, 36(12), 1275–1282. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(98\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(98)00039-6)
- da Silva, J. C., Strazzi-Sahyon, H. B., Nunes, G. P., Andreo, J. C., Spin, M. D., & Shinohara, A. L. (2023). Cranial anatomical structures with high sexual dimorphism in metric and morphological evaluation: A systematic review. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 99, 102592. <https://doi.org/10.1016/J.JFLM.2023.102592>
- Dart, R. (1925). Australopithecus africanus: the man-ape of South Africa. *Nature*, 115, 195–199.
- De Sousa, A., & Cunha, E. (2012). Hominins and the emergence of the modern human brain. *Progress in Brain Research*, 195, 293–322. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53860-4.00014-3>
- Del Bove, A., Menéndez, L., Manzi, G., Moggi-Cecchi, J., Lorenzo, C., & Profico, A. (2023). Mapping sexual dimorphism signal in the human cranium. *Scientific Reports* 2023 13:1, 13(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/S41598-023-43007-Y>
- Esteves, M., Ganz, E., Sousa, N., & Leite-Almeida, H. (2021). Asymmetrical Brain Plasticity: Physiology and Pathology. *Neuroscience*, 454, 3–14. <https://doi.org/10.1016/J.NEUROSCIENCE.2020.01.022>
- Faglioni, P., & Scarpa, M. (1989). Skull Asymmetries Bear No Relation to the Occurrence of Apraxia. A Clinical and Ct-Scan Study in Patients with Unilateral Brain Damage. *Cortex*, 25(3), 449–459. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(89\)80058-9](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(89)80058-9)
- Falk, D., Hildebolt, C., Cheverud, J., Vannier, M., Criss Helmkamp, R., & Konigsberg, L. (1990). Cortical asymmetries in frontal lobes of Rhesus monkeys (*Macaca mulatta*). *Brain Research*, 512(1), 40–45. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(90\)91167-F](https://doi.org/10.1016/0006-8993(90)91167-F)
- Falk, D., Hildebolt, C., Smith, K., Morwood, M. J., Sutikna, T., Brown, P., Jatmiko, Saptomo, E. W., Brunnsden, B., & Prior, F. (2005). The brain of LB1, *Homo floresiensis*. *Science*, 308(5719), 242–245. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1109727/SUPPL_FILE/FALK.SOM.PDF

- Falk, D., Redmond, J. C., Guyer, J., Conroy, G. C., Recheis, W., Weber, G. W., & Seidler, H. (2000). Early hominid brain evolution: a new look at old endocasts. *Journal of Human Evolution*, 38(5), 695–717. <https://doi.org/10.1006/JHEV.1999.0378>
- Falzi, G., Perrone, P., & Vignolo, L. A. (1982). Right-Left Asymmetry in Anterior Speech Region. *Archives of Neurology*, 39(4), 239–240. <https://doi.org/10.1001/ARCHNEUR.1982.00510160045009>
- Fedorov, A., Beichel, R., Kalpathy-Cramer, J., Finet, J., Fillion-Robin, J. C., Pujol, S., Bauer, C., Jennings, D., Fennessy, F., Sonka, M., Buatti, J., Aylward, S., Miller, J. V., Pieper, S., & Kikinis, R. (2012). 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Magnetic Resonance Imaging*, 30(9), 1323–1341. <https://doi.org/10.1016/J.MRI.2012.05.001>
- Felten, D. L., Shetty, A. N., & Netter, F. H. (2010). *Atlas de neurociencia*. Elsevier.
- Ferguson, W. W. (1987). Taxonomic status of the hominine cranium KNM-ER 1813 (primates: Homininae) from the Plio/Pleistocene of Koobi Fora. *Primates*, 28(4), 423–438. <https://doi.org/10.1007/BF02380859/METRICS>
- Fleagle, J. G., & Simons, E. L. (1982). The humerus of *Aegyptopithecus zeuxis*: a primitive anthropoid. *American Journal of Physical Anthropology*, 59(2), 175–193. <https://doi.org/10.1002/AJPA.1330590207>
- Foundas, A. L., Eure, K. F., Luevano, L. F., & Weinberger, D. R. (1998). MRI Asymmetries of Broca's Area: The Pars Triangularis and Pars Opercularis. *Brain and Language*, 64(3), 282–296. <https://doi.org/10.1006/BRLN.1998.1974>
- Frayar, D. W., Lozano, M., Bermúdez de Castro, J. M., Carbonell, E., Arsuaga, J. L., Radović, J., Fiore, I., & Bondioli, L. (2012). More than 500,000 years of right-handedness in Europe. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 17(1), 51–69. <https://doi.org/10.1080/1357650X.2010.529451>
- Galaburda, A. M., LeMay, M., Kemper, T. L., & Geschwind, N. (1978). Right-Left Asymmetries in the Brain. *Science*, 199(4331), 852–856. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.341314>
- García-Taberner, A. (2018). *Paleoneurología comparada de los linajes nenadertales y sapiens. Nuevas evidencias aportadas por los fósiles de El Sidrón (Asturias)*. Universidad Autónoma de Madrid.
- Gering, D. T. (1999). *A System for Surgical Planning and Guidance using Image Fusion and Interventional MR*. Massachusetts Institute of Technology.
- Gering, D. T., Nabavi, A., Kikinis, R., Hata, N., O'Donnell, L. J., Grimson, W. E. L., Jolesz, F. A., Black, P. M., & Wells, W. M. (2001). An integrated visualization system for surgical planning and guidance using image fusion and an open MR. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 13(6), 967–975. <https://doi.org/10.1002/JMRI.1139>
- Gilbert, A. N., & Wysocki, C. J. (1992). Hand preference and age in the United States. *Neuropsychologia*, 30(7), 601–608. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(92\)90065-T](https://doi.org/10.1016/0028-3932(92)90065-T)

- Good, C. D., Johnsrude, I., Ashburner, J., Henson, R. N. A., Friston, K. J., & Frackowiak, R. S. J. (2001). Cerebral Asymmetry and the Effects of Sex and Handedness on Brain Structure: A Voxel-Based Morphometric Analysis of 465 Normal Adult Human Brains. *NeuroImage*, *14*(3), 685–700. <https://doi.org/10.1006/NIMG.2001.0857>
- Greenfield, P. M. (1991). Language, tools and brain: The ontogeny and phylogeny of hierarchically organized sequential behavior. *Behavioral and Brain Science*, *14*, 531–595.
- Grimson, E., Leventon, M., Ettinger, G., Chabrierie, A., Ozlen, F., Nakajima, S., Atsumi, H., Kikinis, R., & Black, P. (1998). Clinical experience with a high precision image-guided neurosurgery system. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *1496*, 63–73. <https://doi.org/10.1007/BFB0056188/COVER>
- Grün, R., Pike, A., McDermott, F., Eggins, S., Mortimer, G., Aubert, M., Kinsley, L., Joannes-Boyau, R., Rumsey, M., Denys, C., Brink, J., Clark, T., & Stringer, C. (2020). Dating the skull from Broken Hill, Zambia, and its position in human evolution. *Nature* *2020* *580:7803*, *580*(7803), 372–375. <https://doi.org/10.1038/S41586-020-2165-4>
- Harris, L. J. (1991). Cerebral control for speech in right-handers and left-handers: An analysis of the views of Paul Borca, his contemporaries, and his successors. *Brain and Language*, *40*(1), 1–50. [https://doi.org/10.1016/0093-934X\(91\)90115-H](https://doi.org/10.1016/0093-934X(91)90115-H)
- Hertz, R. (1960). *Death and the right hand*. Cohen y West.
- Hervé, P. Y., Crivello, F., Perchey, G., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2006). Handedness and cerebral anatomical asymmetries in young adult males. *NeuroImage*, *29*(4), 1066–1079. <https://doi.org/10.1016/J.NEUROIMAGE.2005.08.031>
- Holloway, R. (1981). The Indonesian Homo erectus brain endocasts revisited. *American Journal of Physical Anthropology*, *55*, 503–521.
- Holloway, R. L. (1972). New australopithecine endocast, SK 1585, from Swartkrans, South Africa. *American Journal of Physical Anthropology*, *37*(2), 173–185. <https://doi.org/10.1002/AJPA.1330370203>
- Holloway, R. L. (1980). Indonesian “Solo” (Ngandong) endocranial reconstructions: Some preliminary observations and comparisons with Neandertal and Homo erectus groups. *American Journal of Physical Anthropology*, *53*(2), 285–295. <https://doi.org/10.1002/AJPA.1330530213>
- Holloway, R. L. (1981). Volumetric and asymmetry determinations on recent hominid endocasts: Spy I and II, Djebel Ihroud I, and the salè Homo erectus specimens, with some notes on neandertal brain size. *American Journal of Physical Anthropology*, *55*(3), 385–393. <https://doi.org/10.1002/AJPA.1330550312>
- Holloway, R. L. (2018). On the Making of Endocasts: The New and the Old in Paleoneurology. *Digital Endocasts*, 1–8. https://doi.org/10.1007/978-4-431-56582-6_1

- Holloway, R. L., Broadfield, D. C., & Yuan, M. S. (2004). The Human Fossil Record. In *The Human Fossil Record* (Vol. 3). John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/0471663573>
- Holloway, R. L., & De La Costelareymondie, M. C. (1982). Brain endocast asymmetry in pongids and hominids: Some preliminary findings on the paleontology of cerebral dominance. *American Journal of Physical Anthropology*, 58(1), 101–110. <https://doi.org/10.1002/AJPA.1330580111>
- Holtzen, D. W. (1994). Handedness and sexual orientation. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 16(5), 702–712. <https://doi.org/10.1080/01688639408402683>
- Hopkins, W. D., & Marino, L. (2000). Asymmetries in cerebral width in nonhuman primate brains as revealed by magnetic resonance imaging (MRI). *Neuropsychologia*, 38(4), 493–499. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(99\)00090-1](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(99)00090-1)
- Jacobson, S., & Marcus, E. M. (2008). Neuroanatomy for the neuroscientist. In Springer (Ed.), *Neuroanatomy for the Neuroscientist*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-70971-0/COVER>
- Kertesz, A., Black, S. E., Polk, M., & Howell, J. (1986). Cerebral Asymmetries on Magnetic Resonance Imaging. *Cortex*, 22(1), 117–127. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(86\)80036-3](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(86)80036-3)
- Kertesz, A., Polk, M., Black, S. E., & Howell, J. (1990). Sex, handedness, and the morphometry of cerebral asymmetries on magnetic resonance imaging. *Brain Research*, 530(1), 40–48. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(90\)90655-U](https://doi.org/10.1016/0006-8993(90)90655-U)
- Kimbel, W. H. (1984). Variation in the pattern of cranial venous sinuses and hominid phylogeny. *American Journal of Physical Anthropology*, 63(3), 243–263. <https://doi.org/10.1002/AJPA.1330630302>
- Kimmerle, E. H., Ross, A., & Slice, D. (2008). Sexual Dimorphism in America: Geometric Morphometric Analysis of the Craniofacial Region*. *Journal of Forensic Sciences*, 53(1), 54–57. <https://doi.org/10.1111/J.1556-4029.2007.00627.X>
- Knecht, S., Deppe, M., Ebner, A., Henningsen, H., Huber, T., Jokeit, H., & Ringelstein, E. B. (1998). Noninvasive determination of language lateralization by functional transcranial Doppler sonography: a comparison with the Wada test. *Stroke*, 29(1), 82–86. <https://doi.org/10.1161/01.STR.29.1.82>
- Knecht, S., Dräger, B., Deppe, M., Bobe, L., Lohmann, H., Flöel, A., Ringelstein, E. B., & Henningsen, H. (2000). Handedness and hemispheric language dominance in healthy humans. *Brain*, 123(12), 2512–2518. <https://doi.org/10.1093/BRAIN/123.12.2512>
- Kottak, C. (2011). *Antropologia Cultural* (14^a ed). McGraw-Hill.
- Leakey, L. S. B., & Leakey, M. D. (1964). Recent discoveries of fossil hominids in Tanganyika: at Olduvai and near Lake Natron. *Nature*, 202, 5–7.

- Lehre, A. C., Lehre, K. P., Laake, P., & Danbolt, N. C. (2009). Greater intrasex phenotype variability in males than in females is a fundamental aspect of the gender differences in humans. *Developmental Psychobiology*, *51*(2), 198–206. <https://doi.org/10.1002/DEV.20358>
- LeMay, M. (1976). Morphological cerebral asymmetries of modern man, fossil man, and nonhuman primate. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *280*(1), 349–366. <https://doi.org/10.1111/J.1749-6632.1976.TB25499.X>
- LeMay, M. (1977). Asymmetries of the skull and handedness: Phrenology revisited. *Journal of the Neurological Sciences*, *32*(2), 243–253. [https://doi.org/10.1016/0022-510X\(77\)90239-8](https://doi.org/10.1016/0022-510X(77)90239-8)
- LeMay, M. (1992). Left-right dissymmetry, handedness. *AJNR Am J Neuroradiol*, *13*(2), 493–504.
- LeMay, M., Billig, M. S., & Geschwind, N. (1982). Asymmetries of the Brains and Skulls of Nonhuman Primates. *Primate Brain Evolution*, 263–277. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-4148-2_17
- LeMay, M., & Kido, D. K. (1978). Asymmetries of the Cerebral Hemispheres on Computed Tomograms. *Journal of Computer Assisted Tomography*, *2*(4), 471–476. https://journals-lww-com.sabidi.urv.cat/jcat/Abstract/1978/09000/Asymmetries_of_the_Cerebral_Hemispheres_on.18.aspx
- Llorente, M., Fabr , M., & Mosquera, M. (2008). Lateralización cerebral en chimpancés: una aproximación filogenética al estudio del cerebro humano. *Estudios de Psicología*, *29*(2), 147–161. <https://doi.org/10.1174/021093908784485084>
- Lozano, M., Mosquera, M., de Castro, J. M. B., Arsuaga, J. L., & Carbonell, E. (2009). Right handedness of *Homo heidelbergensis* from Sima de los Huesos (Atapuerca, Spain) 500,000 years ago. *Evolution and Human Behavior*, *30*(5), 369–376. <https://doi.org/10.1016/J.EVOLHUMBEHAV.2009.03.001>
- Luria, A. R. (1976). Basic Problems of Neurolinguistics. *Basic Problems of Neurolinguistics*. <https://doi.org/10.1515/9783110800159/HTML>
- Mankovich, N. J., Cheeseman, A. M., & Stoker, N. G. (1990). The display of three-dimensional anatomy with stereolithographic models. *Journal of Digital Imaging*, *3*(3), 200–203. <https://doi.org/10.1007/BF03167610>
- Mazoyer, B., Zago, L., Jobard, G., Crivello, F., Joliot, M., Perchey, G., Mellet, E., Petit, L., & Tzourio-Mazoyer, N. (2014). Gaussian Mixture Modeling of Hemispheric Lateralization for Language in a Large Sample of Healthy Individuals Balanced for Handedness. *PLOS ONE*, *9*(6), e101165. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0101165>
- McManus, C. (2002). *Right hand, left hand. The origins of asymmetry in brains, bodies, atoms and cultures*. Weidenfeld & Nicolson.

- McRae, D. L., Branch, C. L., & Milner, B. (1968). The occipital horns and cerebral dominance. *Neurology*, *18*(1 Pt 1), 95–98. https://doi.org/10.1212/WNL.18.1_PART_1.95/ASSET/C73FD179-99A6-4CBD-8CDE-7F350B4F556E/ASSETS/WNL.18.1_PART_1.95.FP.PNG
- Mercola, M., & Levin, M. (2001). Left-right asymmetry determination in vertebrates. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, *17*(Volume 17, 2001), 779–805. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.CELLBIO.17.1.779/CITE/REFWORKS>
- Milella, M., Franklin, D., Belcastro, M. G., & Cardini, A. (2021). Sexual differences in human cranial morphology: Is one sex more variable or one region more dimorphic? *The Anatomical Record*, *304*(12), 2789–2810. <https://doi.org/10.1002/AR.24626>
- Mosquera, M. (2005). El surgimiento del lenguaje. In E. (coord.) Carbonell (Ed.), *Homínidos. Las primeras ocupaciones de los continentes* (pp. 213–217). Ariel.
- Moss, M. L., & Young, R. W. (1960). A functional approach to craniology. *American Journal of Physical Anthropology*, *18*(4), 281–292. <https://doi.org/10.1002/AJPA.1330180406>
- Neubauer, S. (2014). Endocasts: Possibilities and Limitations for the Interpretation of Human Brain Evolution. *Brain Behavior and Evolution*, *84*(2), 117–134. <https://doi.org/10.1159/000365276>
- Oppelt, A. (2005). *Imaging Systems for Medical Diagnostics*. Publicis Corporate Publishing.
- Papadatou-Pastou, M. (2011). Handedness and language lateralization: why are we right-handed and left-brained? *Hellenic Journal of Psychology*, *8*, 248–265.
- Petrik, V., Apok, V., Britton, J. A., Bell, B. A., & Papadopoulos, M. C. (2006). Godfrey Hounsfield and the dawn of computed tomography. *Neurosurgery*, *58*(4), 780–786. <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000204309.91666.06>
- Phillips, K. A., & Sherwood, C. C. (2007). Cerebral petalias and their relationship to handedness in capuchin monkeys (*Cebus apella*). *Neuropsychologia*, *45*(10), 2398–2401. <https://doi.org/10.1016/J.NEUROPSYCHOLOGIA.2007.02.021>
- Pieper, S., Halle, M., & Kikinis, R. (2004). 3D Slicer. *2004 2nd IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: Macro to Nano (IEEE Cat No. 04EX821)*, *2*, 632–635. <https://doi.org/10.1109/ISBI.2004.1398617>
- Pilcher, D. L., Hammock, E. A. D., & Hopkins, W. D. (2001). Cerebral volumetric asymmetries in non-human primates: A magnetic resonance imaging study. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, *6*(2), 165–179. <https://doi.org/10.1080/713754406>
- Pinter, C., Lasso, A., & Fichtinger, G. (2019). Polymorph segmentation representation for medical image computing. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, *171*, 19–26. <https://doi.org/10.1016/J.CMPB.2019.02.011>

- Powell, J. L., Kemp, G. J., Roberts, N., & García-Finaña, M. (2012). Sulcal morphology and volume of Broca's area linked to handedness and sex. *Brain and Language*, *121*(3), 206–218. <https://doi.org/10.1016/J.BANDL.2012.03.003>
- Poza-Rey, E. M., Gómez-Robles, A., & Arsuaga, J. L. (2019). Brain size and organization in the Middle Pleistocene hominins from Sima de los Huesos. Inferences from endocranial variation. *Journal of Human Evolution*, *129*, 67–90. <https://doi.org/10.1016/J.JHEVOL.2019.01.006>
- Poza-Rey, E. M., Lozano, M., & Arsuaga, J. L. (2017). Brain asymmetries and handedness in the specimens from the Sima de los Huesos site (Atapuerca, Spain). *Quaternary International*, *433*, 32–44. <https://doi.org/10.1016/J.QUAINT.2015.10.004>
- Rhoton, A. L. (2007). The cerebrum. *Neurosurgery*, *61*(1 SUPPL.), <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000255490.88321.CE>
- Rightmire, G. P. (2004). Brain size and encephalization in early to Mid-Pleistocene Homo. *American Journal of Physical Anthropology*, *124*(2), 109–123. <https://doi.org/10.1002/AJPA.10346>
- Rightmire, G. P. (2017). Middle Pleistocene Homo Crania from Broken Hill and Petralona: Morphology, Metric Comparisons, and Evolutionary Relationships. *Vertebrate Paleobiology and Paleoanthropology*, *9783319466446*, 145–159. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46646-0_11
- Rodriguez, A., Kaakinen, M., Moilanen, I., Taanila, A., McGough, J. J., Loo, S., & Järvelin, M. R. (2010). Mixed-Handedness Is Linked to Mental Health Problems in Children and Adolescents. *Pediatrics*, *125*(2), e340–e348. <https://doi.org/10.1542/PEDS.2009-1165>
- Seidler, H., Bernhard, W., Teschler-Nicola, M., Platzer, W., Neddén, D. zur, Henn, R., Oberhauser, A., & Sjøvold, T. (1992). Some Anthropological Aspects of the Prehistoric Tyrolean Ice Man. *Science*, *258*(5081), 455–457. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1411539>
- Sergi, S. (1929). La scoperta di un cranio del tipo di Neanderthal presso Roma. *Rivista Antropologica. Società Romana Di Antropologia*, *28*, 457–462.
- Steele, J. (2000). Handedness in past human populations: Skeletal markers. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, *5*(3), 193–220. <https://doi.org/10.1080/713754380>
- Stiftung Neanderthal Museum. (2024). *NESPOS Pleistocene People and Places*.
- Stout, D., & Chaminade, T. (2012). Stone tools, language and the brain in human evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *367*(1585), 75. <https://doi.org/10.1098/RSTB.2011.0099>
- Suwa, G., Asfaw, B., Beyene, Y., White, T. D., Katoh, S., Nagaoka, S., Nakaya, H., Uzawa, K., Renne, P., & Woldegabriel, G. (1997). The first skull of Australopithecus boisei. *Nature*, *389*(6650), 489–492. <https://doi.org/10.1038/39037>

- Tan, S. Y., & Poole, P. S. (2020). Allan MacLeod Cormack (1924–1998): Discoverer of computerised axial tomography. *Singapore Medical Journal*, 61(1), 4. <https://doi.org/10.11622/SMEDJ.2020003>
- Tate, J. R., & Cann, C. E. (1982). High-resolution computed tomography for the comparative study of fossil and extant bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 58(1), 67–73. <https://doi.org/10.1002/AJPA.1330580108>
- Tobias, P. V. (1987). The brain of *Homo habilis*: A new level of organization in cerebral evolution. *Journal of Human Evolution*, 16(7–8), 741–761. [https://doi.org/10.1016/0047-2484\(87\)90022-4](https://doi.org/10.1016/0047-2484(87)90022-4)
- Toga, A. W., & Thompson, P. M. (2003). Mapping brain asymmetry. *Nature Reviews. Neuroscience*, 4(1), 37–48. <https://doi.org/10.1038/NRN1009>
- Uomini, N. T. (2011). Handedness in Neanderthals. *Vertebrate Paleobiology and Paleoanthropology*, 9789400704145, 139–154. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0415-2_14/COVER
- Uomini, N. T., & Meyer, G. F. (2013). Shared Brain Lateralization Patterns in Language and Acheulean Stone Tool Production: A Functional Transcranial Doppler Ultrasound Study. *PLOS ONE*, 8(8), e72693. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0072693>
- Vingerhoets, G., Li, X., Hou, L., Bogaert, S., Verhelst, H., Gerrits, R., Siugzdaite, R., & Roberts, N. (2018). Brain structural and functional asymmetry in human situs inversus totalis. *Brain Structure and Function*, 223(4), 1937–1952. <https://doi.org/10.1007/S00429-017-1598-5/FIGURES/7>
- Walker, A., Leakey, R. E., Harris, J. M., & Brown, F. H. (1986). 2.5-Myr *Australopithecus boisei* from west of Lake Turkana, Kenya. *Nature* 1986 322:6079, 322(6079), 517–522. <https://doi.org/10.1038/322517a0>
- Watkins, K. E., Paus, T., Lerch, J. P., Zijdenbos, A., Collins, D. L., Neelin, P., Taylor, J., Worsley, K. J., & Evans, A. C. (2001). Structural Asymmetries in the Human Brain: a Voxel-based Statistical Analysis of 142 MRI Scans. *Cerebral Cortex*, 11(9), 868–877. <https://doi.org/10.1093/CERCOR/11.9.868>
- Watson, T. (1871). *Lectures on the Principles and Practice of Physic* (5th ed., Vol. 1). Jon W. Parker.
- Weber, G. W. (2001). Virtual anthropology (VA): A call for Glasnost in paleoanthropology. *The Anatomical Record*, 265(4), 193–201. <https://doi.org/10.1002/AR.1153>
- Weber, G. W. (2015). Virtual Anthropology. *American Journal of Physical Anthropology*, 156(S59), 22–42. <https://doi.org/10.1002/AJPA.22658>
- Weber, G. W., & Bookstein, F. L. (2011). Virtual anthropology: a guide to a new interdisciplinary field. In *Vienna: Springer*. <https://link.springer.com.sabidi.urv.cat/book/9783211486474>

- Weber, G. W., Recheis, W., Scholze, T., & Seidler, H. (1998). Virtual anthropology (VA): methodological aspects of linear and volume measurements--first results. *Collegium Antropologicum*, 22(2), 575–584.
- Westbury, C. F., Zatorre, R. J., & Evans, A. C. (1999). Quantifying Variability in the Planum Temporale: A Probability Map. *Cerebral Cortex*, 9(4), 392–405. <https://doi.org/10.1093/CERCOR/9.4.392>
- Woodward, A. S. (1921). A new cave man from Rhodesia, South Africa. . *Nature*, 108, 371–372.
- Zilles, K., Dabringhaus, A., Geyer, S., Amunts, K., Qü, M., Schleicher, A., Gilissen, E., Schlaug, G., & Steinmetz, H. (1996). Structural Asymmetries in the Human Forebrain and the Forebrain of Non-human Primates and Rats. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 20(4), 593–605. [https://doi.org/10.1016/0149-7634\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0149-7634(95)00072-0)
- Zollikofer, C. P. E., Ponce de León, M. S., Martin, R. D., & Stucki, P. (1995). Neanderthal computer skulls. *Nature* 1995 375:6529, 375(6529), 283–285. <https://doi.org/10.1038/375283B0>
- zur Nedden, D., Wicke, K., Knapp, R., Seidler, H., Wilfing, H., Weber, G., Spindler, K., Murphy, W. A., Hauser, G., & Platzer, W. (1994). New Findings on the Tyrolean “Ice Man”: Archaeological and CT-Body Analysis Suggest Personal Disaster Before Death. *Journal of Archaeological Science*, 21(6), 809–818. <https://doi.org/10.1006/JASC.1994.1078>