

Morfometría geométrica y 3D en la Antropología Física.

Determinación de la edad al
morir

Programa de Doctorado en Biomedicina:
Evolución humana. Antropología Física y
Forense

Doctorando: Guillermo Bravo Morante

Directores: Markus Bastir y Miguel Cecilio
Botella López





**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

TESIS DOCTORAL:

**Morfometría geométrica y 3D en la antropología física,
determinación de la edad al morir**

Programa de Doctorado en Biomedicina: Evolución humana,
Antropología Física y Forense

AUTOR: Guillermo Bravo Morante

TUTOR: Miguel Cecilio Botella López

DIRECTORES: Dr. Markus Bastir y Dr. Miguel Cecilio Botella López

Granada, 2021

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Guillermo Bravo Morante
ISBN: 978-84-1306-956-2
URI: <http://hdl.handle.net/10481/69845>

Agradecimientos

De pequeño me gustaba un anime, “La Ley de Ueki”, en la que diferentes personajes tenían que competir entre sí, con un premio al ganador de un talento vacío, esto era, adquirir un talento cualquiera a elección. Después de toda la serie conociendo a nuevos personajes, algunos que empezaron como antagonistas y otros como amigos y ganar el talento, Ueki eligió el talento de la Reunión: ser capaz de reencontrarse con toda esa gente que había conocido por el camino y de la que se tuvo que separar por seguir sus sueños. De pequeño, obviamente, no lo entendí. Me parecía un poco ñoño.

Bueno pues ahora lo entiendo, después de años de tesis he tenido amigos, compañeros de piso, clase y laboratorio, profesores, conocidos en un congreso, conocidos por correo electrónico o redes sociales, relaciones que acabaron y otras que acabaron mal. Son muchas personas a las que hace mucho tiempo que no veo y todas esas personas están en esta lista. Si pudiera pedir un deseo tras acabar esto, sería poder reunirme con todos de nuevo.

Una idea recurrente de los últimos meses de mayor estrés acumulado por la pandemia, publicaciones, papeleo, fechas de entrega, correos, etc. que Fred Bookstein resumió a la perfección en nuestro último encuentro: “a estas alturas, la estimación de la edad es irrelevante. No importa, esto que has hecho aquí podría haberlo hecho cualquier otro”. Y creo de verdad que es cierto; lo que he aprendido, lo que he crecido y a la gente a la que he hecho que mi nombre les suene son los resultados finales de mi tesis. Paso, por ello, a discutir estos resultados:

Primero quiero mostrar mi agradecimiento al grupo de los que no me conocen, especialmente durante las cuarentenas, a los creadores de contenido, streamers y youtubers que han sido capaces de entretener a medio mundo, muchos de ellos a costa de su salud mental. Parece una tontería, pero estar atrancado con un párrafo, irme a ver a Knekro dejarse el mes en gachapones, echarme unas risas y volver fresco y animado al ruedo ha sido de vital importancia. Echo mucho

de menos España y Knekro, Chuso, Evangelion entre otros han sido verdadera terapia durante este proceso. Gracias.

Vivir en un pueblo pequeño tiene sus encantos. Todos los vecinos y amigos que preguntan por mí, cómo me va y si estoy bien. Cada vez que me recordáis que me habéis conocido siendo yo un moco y que os he roto alguna maceta con el balón, me hacéis muy feliz. Gracias.

A los amigos del Lol, que me habéis comprado cada "última partida" y que, aunque no lo sepáis, solo oíros me hace sentir en casa. He procrastinado como un bellaco, pero ha merecido la pena. Gracias a Ramón, Adri, Nicla, xPablo, Jota y Critiquin por haberme ayudado a mantener la cordura matando marcianitos, os quiero.

A los amigos que, como bolas de dragón, se han desperdigado por el mundo, cada uno cumpliendo sus metas y a de los que estoy orgulloso a la par agradecido. Laurich, Jeni, Ana Alcaina, Laura Ávila, Nibal, Dilamm, Fran de Lamo, Fede, Borja, Beñat, Pedro Soto, Bea, Kike, Fernando López, Andrea Vera, David Martínez, Javi Parra, Archilla y María Romo. Me alegra saber que vuestro propio esfuerzo y talento os está recompensando, os echo mucho de menos y os quiero aún más.

In the same way I have a family in Spain, I have a family in Newquay. I spent two summers that felt too short with awesome people and a wonderful dog. Thank you, Donnie, Suzanne and Morrie, for accepting me, teaching me English, showing me the wonders of the roast dinner and above all, for loving me. I hope I can see you again soon, I love you.

I also have a family in Austria too (sadly, my German is not enough yet to do this in your language), thank you Sandra Bichler for being my first friend in Vienna and being always there for me, I still get surprised by your kindness and I am very proud of you, I love you. Thank you, Vicky, Kadir, Lea, Elisa and Irene for the nights of eating and drinking that, in my very autistic way, I enjoy deeply. It is amazing how awesome you are and how much you shine, it is gift to be considered you friend, ich liebe euch alle.

My dear fellows from the Konrad Lorenz Institute, Guido Caniglia for believing in my project and guiding me through it with wisdom. Isabella Sarto-Jackson for being an angel, always there to help and share. Eva Lackner, making every lunch break a party, master of espionage in social media and one of the nicest people I know. The environment, the colleges, the invited people make this center awesome. I felt at home there. Thank you so much for helping me polishing my ideas, sharing ice-creams and sangrías, Amit, Hernán, Esther and Julia. Thank you Lumila, Nicole and Stephanie for helping me being a better researcher, you are very kind and supportive, I wish to everyone in their PhD to meet people like you. I love you all.

Big thanks to the Sutterlüty family, Rosalia, Alma, Nina and Anton for always speaking in English so I can be around and for being this supportive and kind with me, ich liebe euch alle. Vielen danke Nadja, Selene and Wilfred for letting me be one more, for showing such a great sportsmanship even when I defeat you in your card games and especially for lending me your girl. You make me feel at home since the first day and even if, sometimes, we can't communicate perfectly, that effort you put into making me feel one more makes me so happy and grateful, you are brilliant people. Ich liebe euch alle.

Media tostada de tomate, un café y a escanear pubis. Entrar al laboratorio y charlar con Margarita; saludar a Javi, a Silvia y a Rosa. Echar un rato por la tarde con Carmen. Estar liado con algo y que Inma venga a tocarme el pelo para relajarse. Esas tardes los jueves escuchando Rock FM con Fernando y escaneando cientos de huesos, o tazas, o pistolas, cualquier cosa con tal de intentar dejar mal al escáner. El laboratorio de Antropología de la Universidad de Granada es el tesoro que es por la gente que lo conforma, lo echo tanto de menos que duele. Toda esta gente ha estado ahí siempre, ha resuelto innumerables dudas, me han echado más manos que las que tenemos en la colección. Ellos me han enseñado antropología y me han transmitido la pasión por este mundo. Especialmente quiero transmitir mi cariño y agradecimiento a Fernando e Inma, que me han aguantado todo, han hecho de los descansos momentos que añorar y del laboratorio mi segundo hogar. Mil gracias, os quiero mucho.

A mis hermanos adoptivos (reconocidos incluso por mi madre), Carlos, Felix y Wido, que se han reído de mí y conmigo hasta la saciedad, que me han llamado Doctor Liendre y Traidoro, que me han llevado a hombros en los momentos en los que no sabía avanzar. Os habéis comido unas turras de campeonato y unas fedeadas reportables. Sois con los que, a pesar de la lejanía, más tiempo he compartido durante estos años. Nada me hace más feliz que saber que os va bien y como sé que este párrafo va a ser objeto de mofa, quiero que sepáis que aun así os quiero.

Gracias a mi familia, ese grupo de personas que no eliges, con quien puedes tener las discusiones más grandes y los que sabes a ciencia cierta que van a ser los primeros en estar ahí cuando los necesitas. Toda la vida me han dicho lo mismo, cuando iban a recogerme en coche, o me sacaban una manta cuando les invadía el sofá, “acuérdate de esto chico, que algún día tendrás que sacarnos de la ruina”. Y parece una tontería, pero esa fe ciega en que iba a lograr lo que me propusiera ha sido mi principal combustible. Siento mucho haber acabado como investigador, no sé si eso os puede sacar de la ruina, pero dado que hay muchos peques nuevos ahora, lo mínimo que puedo hacer es transmitirles la misma confianza a ellos, con la esperanza de que ninguno de ellos acabe siendo biólogo. Gracias por ser mi soporte, por ser una familia fuerte que, a pesar de haber perdido a demasiados integrantes estos últimos años, seguís siendo mi alegría (aunque no os aguante en el grupo de WhatsApp). Gracias Encarna, Mari, Guille, Claudia, Valeria, Raúl, Juanma, Elena, Odei, Violeta, Cristian, Sara, Pili, Rafa, Edgar, Shait y Chiqui y gracias también a los que ya no estáis aquí Paco, Canuto, Vitoria y Vitori, os quiero con locura.

For believing in me, for inviting me to Stanford to work with the top of forensic experts, for the extremely valuable insight and your kind and constructive emails. For letting me be a part of your book and sharing with me your knowledge, I thank you Bridget Algee-Hewitt, I love you.

One of the reasons I came to Vienna was to meet you, Dennis Slice. I had the luck of being your student, of learning from you geometric morphometrics, forensics and, above all, spending time with you in your last visit to Vienna. Your absence is suffered here, its in plain sight that you were a big pilar of the department of Evolutionary Anthropology and we miss you. The last time I wrote

to you, asking when were you coming, you told me that it wouldn't be possible as you got a new puppy and you showed me how cute it was. This acknowledgment won't reach you but still it is important, because you listened to a student with confused and disorganized ideas and helped me to start working on them. I will always remember your brilliant sense of humor and the way you looked at us, your students, seeing in us more that we could even imagine. Thank you, Dennis, I love you.

I met you at the end of my thesis, during the most difficult part. You always know how to motivate me, to read the bright part of the situation and you taught me to appreciate and give value to my own work. You jumped from not knowing me to be coauthor of both of the paper I present here, it has been a lot of work, a lot of emails and revisions. I don't even know how to start paying you back, Barbara Fischer, your kindness and your wisdom made this work and myself substantially better. Thank you for being such a great person, working with you is one of the best things that this 2020 had for me. I love you.

Fred Bookstein was the first name I read when I started reading geometric morphometrics. Who could imagine that I was going to be sitting with him in his office talking about life a few months after that. I still remember how nervous I was the first time I knocked the door of your office, and the second, and the third... Your presence irradiates knowledge to the point that it intimidates. Apart from biology, mathematics, evolution, English, history and geometric morphometrics, you have taught me kindness, perseverance and to never be afraid of saying what I think, even if it is wrong, in order to learn. You had no reasons to help me as much as you have done, but you have done it; with patience despite my clumsiness and a lot of honest and constructive insight. Thank you so much for all of this, I love you.

I remember searching at the webpage of the University of Vienna for the email of Katrin Schäfer, I wanted to go to Vienna for my doctoral stay and I asked her if I would be allowed. I remember that the first day that we were going to meet in person I went to a different University and I arrived 30 mins late. I keep printed the email where you told me to come to Vienna and that has been the base of this work. I feel bad even of how many things you have done for me, you introduced me to awesome people, taught me how to be a good researcher, the

tricks that only experience gives. You are a role model for me, I wish I would be half as talented as you are. With your awesome sense of humor, positive view of even the most difficult situations and superlative kindness I hope one day I can do for someone something like you have done for me. Thank you so much for taking care of me in Vienna, my mom is also very grateful with you. I love you.

De un correo electrónico preguntando por un escáner a codirector de mi tesis, me invitaste a Madrid para enseñarme la base de la morfometría geométrica, y prepararme para lo que vendría. Fuiste tú quien me recomendó venir a Viena, gracias a ti he descubierto esta maravillosa ciudad y siempre estaré agradecido por ello. Has sido el solucionador de problemas más eficaz que conozco y un estupendo director. Trabajar contigo es una experiencia maravillosa, divertido y muy educativa. Del español que se fue a vivir a Viena al vienés que se vino a vivir a España, muchas gracias. Te quiero.

De la multitud de talentos que Miguel Botella tiene, el que más me ha impresionado siempre ha sido su capacidad para sacar lo mejor de las personas, simplemente poniendo confianza en ellos. Hace muchos años te pregunté quién hacía todo esto del 3D en el laboratorio y si podía ayudar, desde ese día, no me has dicho que no nunca. Me diste una llave, acceso a los escáneres y, ante esa confianza, el mayor de mis miedos durante todo este tiempo ha sido decepcionarte. Y he visto ese efecto en mucha gente, he visto a compañeros de carrera con unas notas muy normalitas dejarse la piel en el laboratorio porque tú les dijiste que sí, que podían hacerlo. He visto a gente brillar que, de otro modo, nunca habría descubierto su pasión y aquí me incluyo. Te pedí que fueras mi director del TFG y aceptaste, para el TFM también aceptaste y con la tesis volviste a picar, has estado en los agradecimientos de todos y cada uno de mis pasos en la carrera científica y todo esto te lo debo a ti. Has dejado una marca en mi vida que no se va a borrar nunca. Tu forma de pensar, de tratar a los demás, he intentado absorber todas nuestras charlas y atesoro los ratos que hemos echado juntos porque, más allá de mi director y un modelo a seguir, eres mi amigo. Por cierto, es por tu culpa que esta lista sea tan larga, porque nadie ha sabido ponerme los pies en el suelo como tú y la importancia que tiene ser agradecido con todos los que han estado en el camino. Muchas gracias por todo Miguel, te quiero.

With my companion I try to be grateful every day. I remember storming out of a supermarket one day, almost with a nervous crisis, because I wanted a tuna can and I was not able to understand which one of the different 4 options I wanted. I took life and decided to live it in hard mode in a different country, with a different language, with different people and, despite all this, it is my home, because you live here. Which complains can I have if, at the end, you are here with me? well many, because I like to complain, but everything that has happened, everything I had to leave in Spain is worth because of you, thank you for everything Larissa, you make me a better human with every smile you gift me, I love you to the moon and back.

Mi padre me dijo una vez “hijo, me da igual que seas científico de la NASA que basurero, lo único que me importa es que seas feliz”. Me dijiste muchas otras cosas, pero esta es la que más ha resonado durante las noches que no podía dormir. Hacer el doctorado no me ha hecho feliz durante muchos momentos, muchas veces he seguido adelante por pura inercia, porque parecía más fácil seguir que parar y elegir un camino nuevo. Han pasado muchos años y sigo llevando las llaves sin llavero para que no suenen al andar, porque me recuerda cuanto echo de menos ese sonido al que nunca presté atención, hasta el día que no volvió a sonar. Bueno pues, casi casi lo tengo y, haciendo balance, sin duda he sido más feliz que infeliz durante este camino, por lo que creo que estarías orgulloso de mi. Te quiero, papá.

Si alguien ha sido capaz de mantenerme en las vías, especialmente durante este último año, has sido tú, Dani. De niños la única manera de hablar contigo era jugando al Pro y, a falta de nuestro ritual de ir al Mercadona a pasearnos, jugar al ordenador contigo es lo más especial que tengo en la vida. No imaginas lo feliz que me hace que hayas encontrado a alguien como Irma para estar a tu lado, a la cual estaré agradecido eternamente. Hay momentos en la vida que son como una ola cuando no la esperas, toda la angustia de ser revolcado por la arena sin saber a dónde nos lleva es nada comparado con el miedo que nos queda al saber que, si le damos la espalda, puede venir otra más grande. El mayor miedo que he tenido durante este tiempo es saber si sabríamos encarar la siguiente ola, con arañazos y el culo lleno de tierra, pero enteros. Creo que puedo estar tranquilo, parece mentira, pero tienes reflejos de adultez y una gran cantidad de

talentos que explotar que sospecho que eres el único que no ve. ¿Recuerdas cuando me sanguijuleaste el concurso de ideas?, pues bromas aparte, jamás me habría atrevido a presentarme si no te hubiera tenido conmigo, es tan tuyo como puede ser mío, como tantas otras cosas. Gracias por estar ahí, tú me has dado el coraje para coger a la tesis de la solapa y decirle “mira te comento”. Te quiero.

No se deben de tener favoritos, pero el último puesto y el más importante es para mi madre. Qué razón tenía el que se dio cuenta de lo sabios que se vuelven los padres en el periodo de tiempo en que pasamos de tener 15 a los 25 años, parece que has estudiado más que yo. Es muy fácil ver a una madre desde los ojos de su hijo, ella provee lo que yo necesito, si quiero comer, tengo comida, si quiero cariño, tengo cariño, si me comporto como un gilipollas, tengo un chancletazo pedagógico. Pero lo que ha pasado ella para darme de comer, para darme su tiempo, su paciencia... recién metido en el lago de la adultez, ahora que el agua fría me llega a la cintura, sigo sin entender cómo lo ha hecho. Mi madre es la mejor madre del mundo y punto. Esta tesis es suya, la defensa será suya y todo lo que llegue a hacer en la vida será suyo porque es ella la que me da cuerda y con la matada que se ha dado y se sigue dando para mantenernos a mi hermano y a mi merece como mínimo, eso. Economista, psicóloga, botánica, enfermera, médica alternativa (nadie es perfecto), abogada, cocinera y entre mil cosas más, madre. Has dejado un listón muy difícil de superar. Gracias mamá, te quiero con todo mi corazón.

Resumen

La antropología forense es una rama dentro de la antropología física que se encarga de determinar el perfil biológico a partir de restos humanos a fin de identificar estos restos. Para ello, se han desarrollado numerosas técnicas de estimación del sexo, edad, estatura además de las diferencias inter e intra poblacionales.

La estimación precisa y repetible de estas características a partir de restos esqueléticos no es una tarea sencilla, ya que depende del estado de conservación de la muestra, la presencia de determinados huesos, así como los medios técnicos a disposición del antropólogo para realizar la identificación.

En antropología forense, una de las características más frecuentes utilizadas para la estimación de la edad al morir es la forma de la cara articular de la sínfisis del pubis. Hace 100 años de la publicación del primer método con este fin; durante este siglo, hemos modificado y puesto a prueba este método y, si bien se sigue utilizando a día de hoy, ha demostrado tener grandes carencias y limitaciones. Otro problema de este método y de todos los existentes basados en la asignación de fases es el requisito previo de especialización que necesita el antropólogo para ser capaz de asignar las fases correctamente. Debido a esto, en los últimos años e impulsado por el auge de nuevas tecnologías, los métodos computacionales están sustituyendo a aquellos basados en fases.

En este trabajo, se han puesto a prueba diversas técnicas utilizadas en otras ramas de la ciencia con la meta de mejorar el excelente trabajo realizado por el grupo de Stoyanova et al. con su software llamado “For Age”.

Cada metodología adaptada a la estimación de la edad al morir ha aportado información valiosa para pulir el método, culminando en el filtro de paso de banda de energía de torsión, una técnica de estadística multivariable englobada dentro de la morfometría geométrica que ha reportado los mejores resultados en estimación de la edad publicados a día de hoy.

Esta metodología no solo supone una mejora sustancial en la estimación de la edad, también podría ser aplicable, dentro de la antropología física, para la estimación de otras características del perfil biológico. Además, elimina el error inter e intra observador típico de los métodos de estimación basados en la comparación visual.

Por último, el desarrollo de este trabajo también saca a relucir los defectos y carencias que los métodos de estimación de la edad al morir tienen, incluidos los computacionales y cómo podríamos abordar este problema de cara al futuro.

Para facilitar la difusión de este trabajo, los resultados principales han sido publicados en dos revistas científicas indexadas en el JCR perteneciendo al Primer cuartil dentro de la Antropología física. Estos son sus resúmenes:

Bravo Morante G, Bookstein FL, Fischer B, Schaefer K, Alemán I, Botella MC (2021). Correlation of the human pubic symphysis surface with age-at-death: A novel quantitative method based on a bandpass filter. International Journal of Legal Medicine.

La estimación de la edad al morir a partir de restos esqueléticos empieza típicamente analizando la rugosidad de la superficie de las caras articulares de la sínfisis del pubis. Este estudio presenta un nuevo método cuantitativo que adapta una herramienta de la morfometría geométrica, el filtrado de paso de banda de energía de torsión, para capturar solo los cambios relacionados con la edad de las superficies articulares.

La muestra del estudio consistió en 440 huesos púbicos escaneados en 3 dimensiones de hombres entre 14 y 82 años de edad, los cuales fueron marcados con 102 landmarks y semilandmarks. De la muestra original, se seleccionaron 371 especímenes dentro de una distancia de Procrustes de 0.05 del promedio específico de cada lado. Para esta submuestra, la edad se correlacionó con la energía de torsión total (calculada como la suma de las amplitudes de las deformaciones parciales al cuadrado) para una amplia gama de filtros de paso de banda posibles.

Para las 188 superficies articulares del lado derecho de nuestra submuestra, la correlación entre la edad y las versiones filtradas de paso de banda de la energía de torsión alcanza un pico relativamente pronunciado en $r = -0,648$ para edades de hasta 49 años contra las primeras siete amplitudes de deformación parcial únicamente. El hallazgo para las sínfisis izquierdas es similar.

Los resultados demuestran que, por debajo de los 50 años, los cambios de forma de la superficie de la sínfisis relacionados con la edad pueden detectarse mejor mediante una versión filtrada de paso bajo de la energía de torsión: señales en las escalas geométricas de rugosidad más grandes en lugar de su espectro completo.

La combinación de este método con información de otras características esqueléticas podría mejorar aún más la estimación de la edad al morir basada en la superficie articular del pubis.

Bravo Morante G, Fischer B, Botella MC, Bastir M (2021). The outline of the pubic symphysis is sexually dimorphic and changes with age in humans. Journal of Anthropological Sciences.

La superficie articular de la sínfisis del pubis es un rasgo importante para la estimación de la edad al morir a partir de restos óseos humanos. En este trabajo, demostramos por primera vez que el contorno de la superficie de la sínfisis púbica humana es sexualmente dimórfico y que cambia con

la edad. Presentamos un análisis de morfometría geométrica basado en una muestra de 323 pubis de hombres y mujeres en el rango de edad de 14 a 82 años. Estos huesos se escanearon en 3 dimensiones y los modelos de superficie resultantes se midieron a lo largo de los bordes ventral y dorsal de la superficie articular de la sínfisis utilizando 2 landmarks y 36 semilandmarks. Nuestros hallazgos implican que los cambios relacionados con la edad en el contorno de la superficie articular de la sínfisis difieren entre sexos. Según nuestros resultados, la edad explica el 5% de la variación total de la forma en las mujeres, pero menos del 1% en los hombres. Estos hallazgos en el contorno de la cara articular del pubis podrían complementar los métodos existentes de estimación del sexo y la edad al momento de la muerte basados en otras características de la superficie ósea púbica.

Para alcanzar los resultados de este trabajo, se han aplicado diversas técnicas frecuentemente utilizadas en campos ajenos a la antropología física que tienen un enorme potencial en la creación de nuevas metodologías para la estimación de la edad al morir, sin embargo, esta aplicación tiene que ser coherente biológica y matemáticamente, lo cual requiere de un contexto teórico robusto en evolución humana. La posibilidad de digitalizar la muestra a estudio en 3D abre la puerta a la inclusión de nuevas técnicas y la mejora de las ya existentes. Aquí mostramos la mejor correlación publicada hasta la fecha entre la edad al morir y la sínfisis del pubis humano en un método cuantitativo.

Abstract

Forensic anthropology is a branch within physical anthropology that is responsible for determining the biological profile from human remains in order to identify these remains. For this, numerous techniques have been developed to estimate sex, age, height, as well as inter- and intra-population differences.

A precise and repeatable estimation of these characteristics from skeletal remains is not an easy task, since it depends on the state of conservation of the sample, the presence of certain bones, as well as the technical means available to the anthropologist to carry out the identification.

In forensic anthropology, one of the most frequent characteristics used to estimate age at death is the shape of the articular face of the symphysis pubis. It has been 100 years from the publication of the first method for this purpose; During this century, we have modified and tested this method, and while it is still used today, it has proven to have major shortcomings and limitations. Another problem with this method and with all existing ones based on phase assignment is the prerequisite of specialization that the anthropologist needs to be able to assign the phases correctly. Due to this, in recent years and driven by the rise of new technologies, computational methods are replacing those based on phases.

In this work, various techniques used in other branches of science have been tested with the goal of improving the excellent work done by the group of Stoyanova et al. with their software called "For Age". Each methodology, adapted

to the estimation of age at death, has provided valuable information to refine the method, culminating in the bandpass filter of bending energy, a multivariate statistics technique from the geometric morphometrics toolkit that has reported the best results in computational age at death estimation published till today.

This methodology not only supposes a substantial improvement in the estimation of age, it could also be applicable, within physical anthropology, for the estimation of other characteristics of the biological profile. In addition, it eliminates the typical inter- and intra-observer error of estimation methods based on visual comparison.

Finally, the development of this work also highlights the defects and shortcomings that the methods of estimating age at death have, including computational ones, and how we could address this problem in the future.

To facilitate the dissemination of this work, the main results have been published in two scientific journals indexed in the JCR belonging to the First quartile within Physical Anthropology. These are their summaries:

Bravo Morante G, Bookstein FL, Fischer B, Schaefer K, Alemán I, Botella MC (2021). Correlation of the human pubic symphysis surface with age-at-death: A novel quantitative method based on a bandpass filter. International Journal of Legal Medicine.

Age-at-death estimation from skeletal remains typically utilizes the roughness of pubic symphysis articular surfaces. This study presents a new quantitative method adapting a tool from geometric morphometrics, bandpass filtering of partial warp bending energy to extract only age-related changes of the surfaces.

The study sample consisted of 440 surface-scanned symphyseal pubic bones from men between 14 and 82 years of age, which were landmarked with 102 fixed and surface semilandmarks. From the original sample, 371 specimens within Procrustes distance of 0.05 of the side-specific average were selected. For this subsample, age was correlated with total bending

energy (calculated as summed squared partial warps amplitudes) for a wide range of plausible bandpass filters.

For our subsample's 188 right-side surfaces, the correlation between age and bandpass filtered versions of bending energy peaks relatively sharply at $r = -0.648$ for ages up through 49 years against the first seven partial warp amplitudes only. The finding for left symphyses is similar.

The results demonstrate that below age 50, the symphyseal surface form changes most systematically related to age may be best detected by a lowpass-filtered version of bending energy: signals at the largest geometric scales of roughness rather than its full spectrum.

Combining this method with information from other skeletal features could further improve age-at-death estimation based on the symphyseal pubic surface.

Bravo Morante G, Fischer B, Botella MC, Bastir M (2021). The outline of the pubic symphysis is sexually dimorphic and changes with age in humans. Journal of Anthropological Sciences,

The bony symphyseal surface is an important trait for age-at-death estimation from human skeletal remains. In this paper, we demonstrate for the first time that the outline of the human symphyseal surface is sexually dimorphic and that it changes with age. We present a geometric morphometric analysis based on a sample of 323 symphyseal pubic bones from males and females in the age range of 14 to 82 years. These bones were surface-scanned and the resulting surface models were measured along the ventral and dorsal borders of the symphyseal surface using 2 fixed and 36 curve semilandmarks. Our findings imply that age-related changes in the outline of the symphyseal surface differ between the sexes. According to our results, age explains 5% of total shape variation in females, but less than 1% in males. We discuss that these findings for the

outline, which could potentially complement existing sex and age-at-death estimation methods based on other features of the bony pubic surface.

To achieve the results of this work, various techniques frequently used in fields outside of physical anthropology have been applied that have enormous potential in the development of new methodologies for estimating age at death, however, this application has to be biologically and mathematically coherent, which requires a robust theoretical context in human evolution. The possibility of digitizing the sample to study in 3D opens the door to the inclusion of new estimation techniques and the improvement of the existing ones. Here we show the best correlation published to date between age at death and human symphysis pubis in a quantitative method.

RESUMEN	XIX
ABSTRACT	XXVI
CAPÍTULO 1. PREFACIO	1
1. PREFACIO	3
CAPÍTULO 2. EL PUBIS	7
2.1 LA ANATOMÍA DEL PUBIS Y LA SÍNFISIS PÚBLICA	9
2.2 LA METAMORFOSIS PÚBLICA	13
2.3 LA EVOLUCIÓN DEL PUBIS	16
2.3.1 El pubis en otras especies	21
2.3.2 La evolución en la bibliografía	24
2.4 LA HISTORIA EN FORENSE	24
2.4.1 Métodos de estimación basados en fases	26
2.4.2 Métodos de estimación computacionales	34
2.4.3 Método de estimación: For Age	37
CAPÍTULO 3. OBJETIVOS	41
3.1 OBJETIVOS	43
CAPÍTULO 4. LA MUESTRA	45
4.1 LA COLECCIÓN	47
4.2 DIGITALIZACIÓN DE LA MUESTRA	48

CAPÍTULO 5. PROBANDO FOR AGE	54
5.1 ANTES DE USAR FOR AGE	56
5.2 RESULTADOS DE FOR AGE	58
5.3 DISCUSIÓN: FOR AGE	63
CAPÍTULO 6. LA MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA	66
6.1 INTRODUCCIÓN A LA MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA	68
6.2 EL CONCEPTO DE <i>FORMA</i>	70
6.3 LANDMARKS Y SEMILANDMARKS	73
6.4 EL ANÁLISIS	75
6.5 EL SOFTWARE	78
6.6 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA: LANDMARKS	80
6.7 INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO MORFOMÉTRICO	84
6.8 MATERIAL Y MÉTODOS: MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA	85
6.9 RESULTADOS DEL ESTUDIO MORFOMÉTRICO	87
6.10 DISCUSIÓN: MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA	92
CAPÍTULO 7. LA MATRIZ DE CO-OCURRENCIA DE ESCALA DE GRISES	96
7.1 INTRODUCCIÓN A LA MATRIZ DE CO-OCURRENCIA DE ESCALA DE GRISES	98
7.2 PREPARACIÓN DE LAS IMÁGENES	101
7.3 RESULTADOS DE LA MATRIZ DE CO-OCURRENCIA	102
7.4 DISCUSIÓN: MATRIZ DE CO-OCURRENCIA DE ESCALA DE GRISES	112
CAPÍTULO 8. LA ENERGÍA DE TORSIÓN	117
8.1 INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA DE TORSIÓN	119
8.2 ENERGÍA DE TORSIÓN EN VIEWBOX4	120
8.3 RESULTADOS DE LA ENERGÍA DE TORSIÓN	121

8.4	DISCUSIÓN: ENERGÍA DE TORSIÓN	123
CAPÍTULO 9. EL FILTRO DE PASO DE BANDA DE ENERGÍA DE TORSIÓN		126
9.1	INTRODUCCIÓN AL FILTRO DE PASO DE BANDA DE ENERGÍA DE TORSIÓN	128
9.2	REQUISITO PREVIO: ESTIMACIÓN POR TODD	129
9.3	RESULTADOS DEL FILTRO DE PASO DE BANDA DE ENERGÍA DE TORSIÓN	130
9.4	DISCUSIÓN: FILTRO DE PASO DE BANDA DE ENERGÍA DE TORSIÓN	137
CAPÍTULO 10. DISCUSIÓN GLOBAL		141
10.1	ESTIMAR LA EDAD AL MORIR	143
CONCLUSIONES		148
CONCLUSIONS		154
BIBLIOGRAFÍA		156

Capítulo 1

Prefacio

1. PREFACIO

Este trabajo se presenta con una narrativa que se alejó pronto del Plan de Investigación presentado en 2015. En ese momento, las técnicas de morfometría geométrica parecían tener un enorme potencial aplicable a la antropología física. La estimación de la edad es una parte fundamental del perfil biológico y las técnicas utilizadas actualmente cuentan con facilidades muy difíciles de superar. Si bien las estimaciones pueden no ser muy precisas en algunos casos, la rapidez y sencillez de los métodos utilizados son inalcanzables por cualquier tipo de intento computacional. Una estimación precisa no lo es todo, cualquier intento de mejora que pretenda sustituir a los métodos tradicionales en el día a día de la antropología física y, concretamente, forense, necesita estar a la altura también en otros aspectos.

La morfometría geométrica clásica demostró no ser suficiente. Ni como estimador de la edad ni en facilidad y rapidez. Las técnicas de morfometría geométrica son matemáticamente muy complejas y cuentan con limitaciones y requerimientos que no siempre sabemos cumplir. Factores como el tamaño de la muestra versus la cantidad de variables, la homogeneidad de la muestra y las regresiones lineales pueden crear artefactos fácilmente interpretables como resultados (que no lo son).

En mi caso, podría resumir mi tesis doctoral como el paso de “la morfometría geométrica revolucionará la antropología física” a “la morfometría geométrica es profundamente compleja, pero con el conocimiento adecuado se pueden hacer avances en antropología física”. Yo carecía por completo de este conocimiento. Markus Bastir, Barbara Fischer, Katrin Schäfer, Philipp Mitteröcker, Dennis Slice y Fred Bookstein han sido capaces de enseñarme lo difícil que son estas técnicas y, sobre todo, me han enseñado cautela a la hora de aplicarlas. Creo poco apropiado enfrentarse a un análisis de componentes principales sin tener a un especialista en matemáticas o estadística multivariable cerca. Para conceptos como “Partial warp” me ha llevado meses llegar a entender las palabras que usamos para definirlos y dos años para saber de qué hablo cuando me refiero a ellos.

La realización de este trabajo me ha llevado por un camino casi cíclico de inspiración/descubrimiento, aprendizaje, aplicación, interpretación, aprendizaje, descarte. Pero de cada descarte se han podido recuperar fragmentos útiles. El problema de la estimación de la edad al morir basado en una regresión lineal es complicado de resolver. Durante los últimos meses de mi tesis tuve la oportunidad de participar en el capítulo de crítica de un libro (en proceso de publicación) que recopila las técnicas más punteras de estimación de la edad al morir. Este capítulo, provisionalmente titulado como “The fallacy of forensic age estimation from morphometric quantifications of the pubic symphysis” recopila las carencias en la “estimación” que podemos obtener de la cuantificación de un proceso biológico como la metamorfosis púbica. Y son muchas.

No es motivo para desalentarse, ni mucho menos. Los intentos de cuantificación de la superficie articular del pubis que aquí presento no son perfectos, pero la estimación de la edad basada en fases o en árboles de clasificación tampoco lo son. Lo que sí ha demostrado ser crucial es que conocer la teoría biológica y el proceso de metamorfosis con profundidad ha sido la guía que he seguido para mejorar los resultados, desde un análisis de componentes principales incapaz de separar siquiera sínfisis jóvenes de las más mayores hasta la correlación edad/cuantificación más alta publicada hasta la fecha en un método computacional.

Sinceramente, no veo el filtro de paso de banda de energía de torsión siendo utilizado en una sala de autopsias o en una excavación arqueológica. Requiere de bastante tiempo y preparación. Sin embargo, sí que puede ser de utilidad en situaciones en las que se requiera mayor precisión y es una puerta abierta a nuevas metodologías que combinen diversas técnicas que cubran diversos huesos a lo largo de diferentes rangos de edad.

Capítulo 2

El pubis

2.1 LA ANATOMÍA DEL PUBIS Y LA SÍNFISIS PÚBICA

La sínfisis púbica es una articulación anfiartroïdal que consiste en un disco de fibrocartílago flanqueado por las superficies articulares de los pubis (Becker, Woodley, & Stringer, 2010; Rosse & Gaddum-Rosse, 1997). Funcionalmente, resiste tensión y compresión y es capaz de ganar flexibilidad durante las últimas etapas del embarazo y parto (Becker et al., 2010).

La superficie articular del pubis es ovalada, ligeramente convexa y orientada oblicuamente en el plano sagital, en dirección posteroinferior y en dirección craneocaudal (Figura 1). La longitud media de la superficie articular está entre los 30-35 mm con una anchura media de 10-12 mm (Testut, 1928). Las caras son paralelas posteriormente, pero pueden divergir en el resto (Aeby, 1858; Fick, 1904). Ambas superficies articulares están cubiertas de cartílago hialino que vería entre 1-3 mm de grosor, este grosor disminuye con la edad (Loeschcke, 1912).

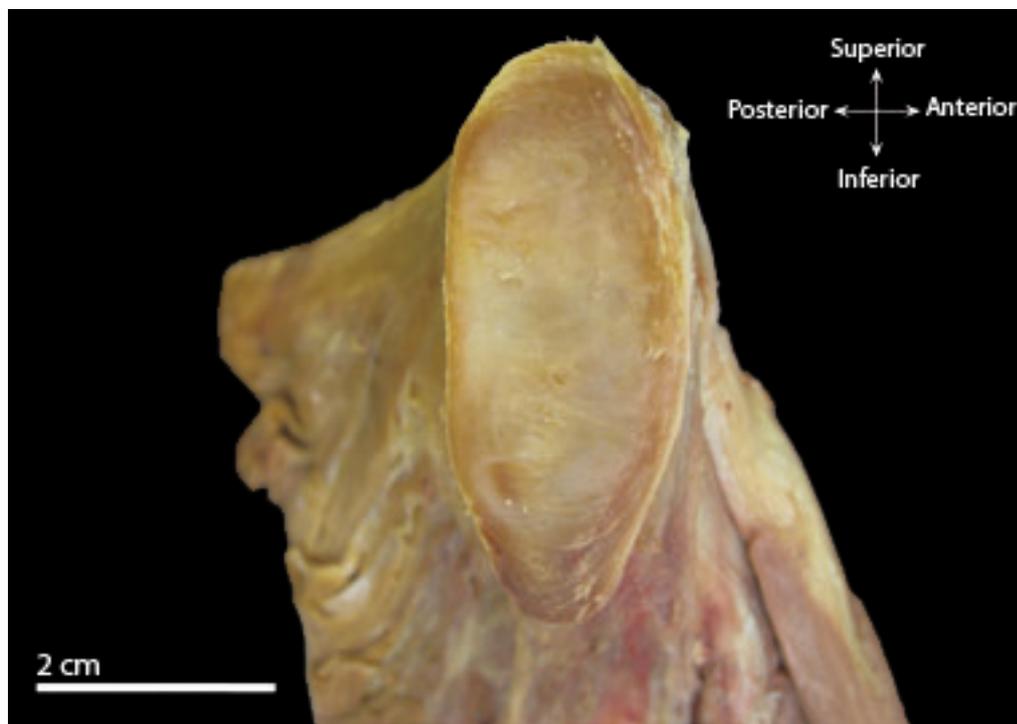


Figura 1. Superficie articular de la sínfisis púbica (Modificada de Becker et al., 2010).

Como puede verse en la Figura 2, la superficie ósea es irregular en adultos jóvenes (Fick, 1904; Luschka, 1864) pero se vuelve suave y lisa alrededor de los 30 años de edad (Todd, 1920). Otros cambios de origen degenerativo como el estrechamiento de la articulación, esclerosis subcondral e irregularidad en los bordes tanto ventral como dorsal pueden ocurrir desde los 60 años (Todd, 1930).

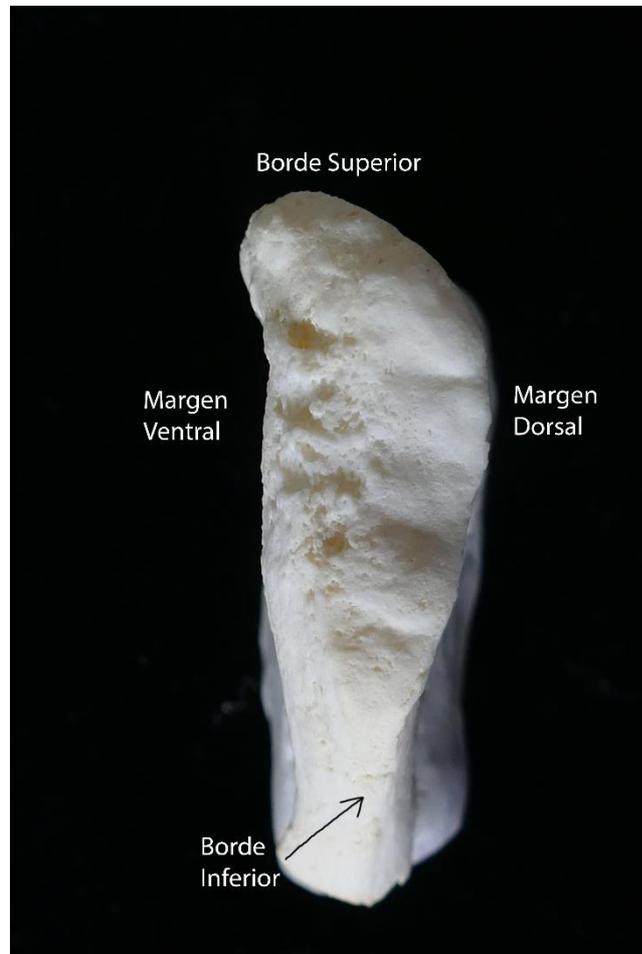


Figura 2. Anatomía de la cara articular del pubis (femenino de 26 años de edad).

El disco interpúbico tiene forma de cuña, con forma de Y en la sección axial con su vértice en dirección posterior (Fick, 1904; Fuss & Bacher, 1991; Testut, 1928). El disco tiene una “cintura” estrecha y es más ancho superior e inferiormente (Becker et al., 2010; E. Weber, 1830). Este disco está formado por capas externas de fibras oblicuas que son más anchas anteriormente y cuenta con una hendidura interpúbica, una cavidad oval que aparece dentro del disco (Figura 3). Esta está típicamente localizada en la parte superior y posterior del disco, ocupando cerca de la mitad de la altura del disco; sus paredes son

irregulares, que pueden llegar a proyectarse en el interior del lumen. Esta hendidura podría ser de origen degenerativo (Ruth, 1937).

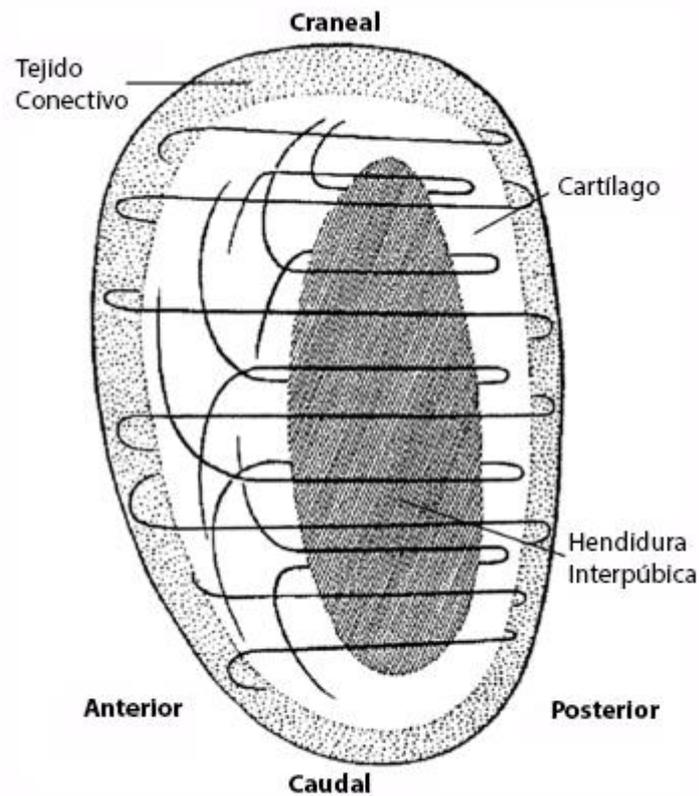


Figura 3. Sección sagital de disco interpúbico (modificada de Schmidt, 1956).

La sínfisis púbica está reforzada por cuatro ligamentos, estos son el ligamento púbico superior, el ligamento púbico inferior (Figura 4), el ligamento púbico anterior y el ligamento púbico posterior (Becker et al., 2010).

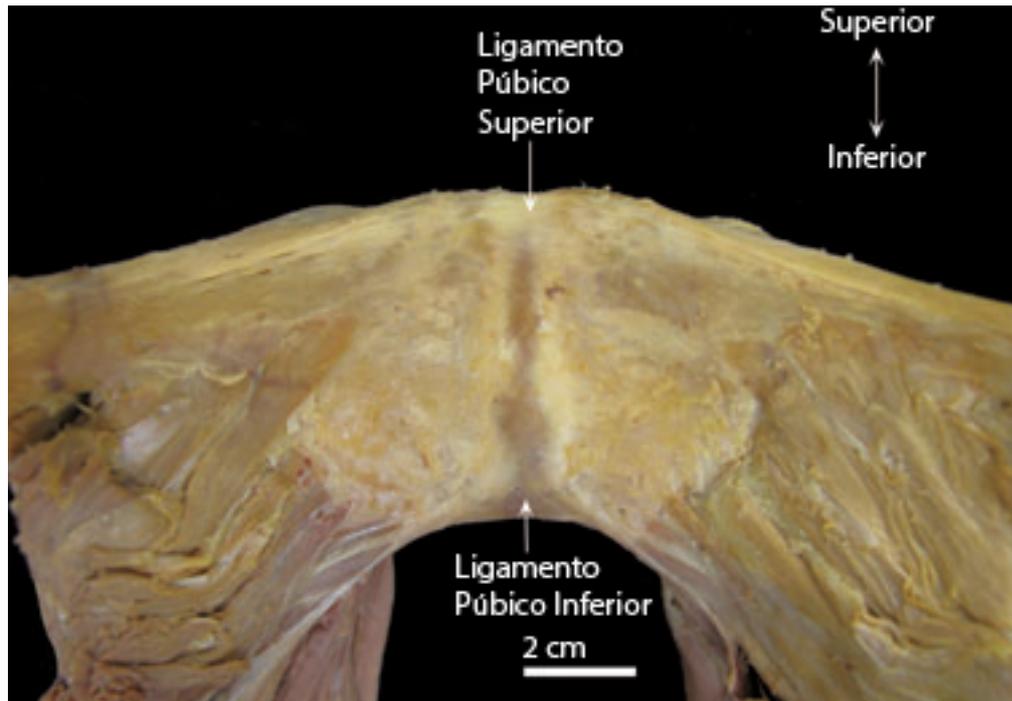


Figura 4. Vista posterior de los ligamentos púbicos superior e inferior (modificada de Becker et al., 2010).

En humanos, la pelvis es el hueso con mayor dimorfismo sexual del esqueleto, y el dimorfismo sexual en la pelvis está bien estudiado (Arzuaga & Carretero, 1994; Fischer & Mitteroecker, 2015, 2017; Kurki, 2011; Tague, 1992; Walrath & Glantz, 1996). Esto es de gran interés en medicina, donde la sínfisis del pubis es relevante para la ortopaedia y obstetricia, dado que esta articulación necesita mantener la estabilidad de la cintura pélvica al mismo tiempo que permite cierto grado de flexibilidad, particularmente durante el embarazo y parto. Si este equilibrio se pierde, patologías como el dolor de cintura pélvica asociado al embarazo pueden aparecer (Becker et al., 2010). Bajo presión intensa, la sínfisis púbica puede incluso romperse especialmente en atletas con una gran carga de trabajo en el tren inferior y durante el parto (Becker et al., 2010). Antes de que la técnica de la cesaría fuera común y segura, sinfisostomias eran practicadas regularmente para facilitar el parto. En este procedimiento, el cartílago de la sínfisis es cortado quirúrgicamente para ensanchar el canal del parto en los casos en los que el parto se dificulta. Debido a la inestabilidad resultante de la cintura pélvica y las consecuencias a largo plazo asociadas para la salud de la madre, esta técnica ya no se utiliza en obstetricia moderna, aunque

sigue requiriéndose a ella como último recurso cuando la cesaría no es posible (Monjok, Smesny, Essien, & Okokon, 2011).

2.2 LA METAMORFOSIS PÚBLICA

Las estructuras epifisarias asociadas con el pubis humano presentan remanentes del epipubis y el hipoisquion que podemos encontrar en muchos grupos animales (Todd, 1920). Debido a las evidencias obtenidas por comparación, Todd propuso que la sínfisis púbica humana es de naturaleza retrogresiva, dado que las estructuras epifisarias involucradas en la metamorfosis de la cara articular presentan vestigios bilaterales de lo que él llamó “barra media”; esta barra media es la estructura ósea mediante la cual las hemipelvis de gran número de mamíferos se fusionan, en la mayoría de los casos es continua con la epífisis isquial.

El hecho de que en humanos no aparece esta barra media se puede deber a la selección de una sínfisis que tienda a resistir la fusión y mantenga la flexibilidad en esa región, facilitando el parto (Todd, 1920, 1923). Esto deja a la articulación como un punto débil potencial en la mecánica del anillo pélvico. Su estructura podría reflejar el compromiso entre la rigidez esencial para mantener el funcionamiento del suelo pélvico y la estabilidad estructural que requiere la bipedestación y, a su vez, cierto grado de elasticidad (Becker et al., 2010).

En el estado juvenil, el pubis es un capuchón de cartílago continuo del isquiopubis que empieza sobre la región del tubérculo púbico. El proceso de osificación comienza en ambos extremos de la zona cartilaginosa con el isquion surgiendo por delante del extremo púbico (Scheuer & Black, 2004).

Se ha sugerido que la sínfisis se comporta como dos zonas distintas, estas serían las hemicaras ventral y dorsal. McKern y Stewart (McKern & Stewart, 1957) propusieron que solo la parte ventral de la sínfisis muestra una progresión epifisaria, en cambio, la zona dorsal solo reflejaría los cambios en la estructura de la diáfisis. Esta diferenciación morfológica se basa en una premisa anatómica: solo la parte ventral de la articulación está separada por el disco interpúbico, no

es así en el caso de la superficie posterior de la cara púbrica. No sorprende, por este motivo, que es la zona ventral de la sínfisis púbrica a la que más atención se presta durante la metamorfosis. Todd consideró esta estructura como los vestigios de la barra media (Todd, 1930).

Lo que fue denominado como estado pre-epifisario por Meindl en 1985 (Meindl, Lovejoy, Mensforth, & Walker, 1985) es característico por las marcadas crestas y surcos que cruzan la superficie articular. No hay borde óseo a lo largo del margen ventral y los límites superior e inferior de la superficie auricular están poco definidos. Esta morfología es habitual en individuos de hasta, aproximadamente, 20 años de edad. El primer cambio que nos encontramos en el estado pre-epifisario es que, mediante un proceso de adición, se deposita hueso en la cara dorsal primero, provocando el alisado de las crestas y surcos (entre 15 y 23 años). La delimitación de la extremidad inferior tiende a ocurrir primero (25 años) y esta aparece también por adición de hueso. La extremidad superior comienza a delimitarse entre los 23 y los 27 años, esta puede surgir bien por la fusión de un nódulo de osificación o adición de hueso. Todd consideraba este nódulo superior homólogo al epipubis en otros mamíferos ya que este nódulo no solo forma el límite superior de la superficie auricular, también se extendería inferiormente para formar la parte superior de la rampa ventral, un área biselada de hueso que se desarrollará a lo largo de la zona ventral de la articulación separando la cara auricular de la superficie lateral del cuerpo púbrico (Figura 5).



Figura 5. Cambios derivados de la edad en la superficie articular del pubis. De izquierda a derecha 18 años, 40 años, 60 años.

El resto de esta rampa ventral está formado bien por un centro de osificación de la zona inferior o por simple adición de hueso (Todd, 1920). Para Todd, la formación de la rampa ventral sería homóloga de los cambios que tienen lugar en la barra media en otros mamíferos y el nódulo de osificación inferior será homólogo del hipoisquion.

Frecuentemente, las progresiones superior e inferior y la rampa ventral no llegan a juntarse, dejando un hiato en el anillo ventral superior (Figura 6). La formación activa de la rampa suele ocurrir entre los 24 y los 30 años, aunque normalmente no acaba de completarse hasta los 35. Al avanzar la edad, la zona dorsal tiende a mostrar menos maduración. Un pequeño margen dorsal empezaría a desarrollarse en el medio del borde alrededor de los 18 años y continuará su expansión superior e inferior hasta que el borde defina un anillo. Esto ocurre al final de la veintena. Los valles y las crestas de la cara dorsal empiezan a llenarse primero, creando una platea y vestigios de las crestas pueden ser evidentes hasta, al menos, los 25 años. Cerca de los 30, la platea dorsal se aplanará y adquirirá una apariencia granular (Meindl et al., 1985; Todd, 1920).

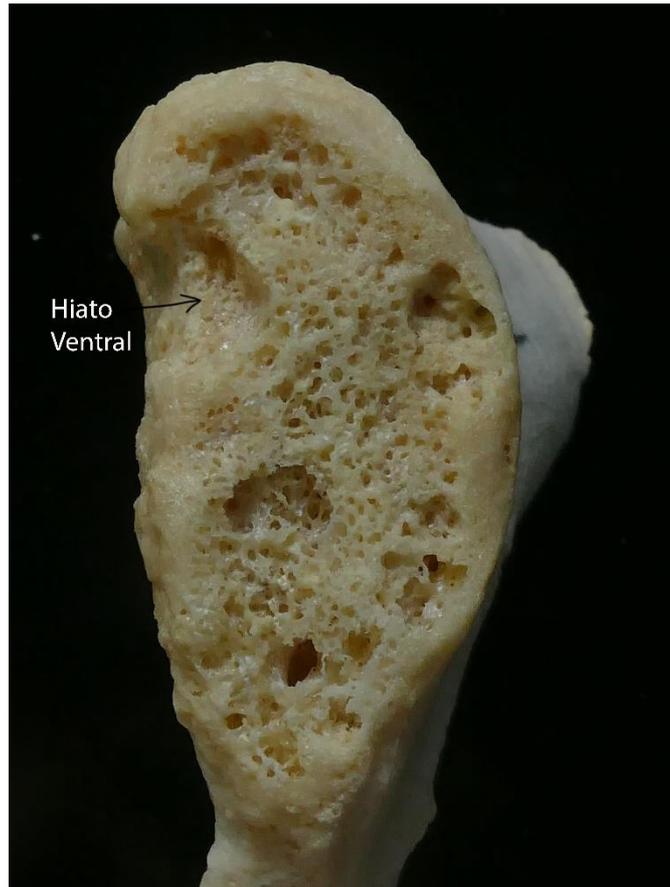


Figura 6. Hiato ventral formado al fallar al encontrarse las progresiones superior e inferior de la rampa ventral.

Así, los cambios en la sínfisis muestran un prolongado periodo de desarrollo y no llega a estar enteramente madura hasta después de los 40 años. Tras esta edad los cambios tienden a ser de naturaleza degenerativa, con una rotura del contorno de la sínfisis y degeneración generalizada de la textura de la cara (Meindl et al., 1985).

2.3 LA EVOLUCIÓN DEL PUBIS

La estructura de la pelvis deriva de nuestros ancestros cuadrúpedos, fue la evolución del bipedalismo hace 6-7 millones de años lo que transformó en gran medida la estructura ósea y muscular de la pelvis (DeSilva & Rosenberg, 2017; Meindl et al., 1985).

El motivo por el cual la pelvis y, concretamente, la sínfisis púbica tiene un desarrollo tan característico está aún en debate, estudios han encontrado que el patrón de cambio de la forma de la pelvis desde los 20 a los 45 años es significativamente diferente al de después de los 40, periodo en el cual los hombres muestran mayor regularidad que las mujeres. La forma interna de la pelvis, el diámetro conocido como el canal del parto, se vuelve más redondeada hasta los 40-45 y más ovalada después. De igual manera, el ángulo subpúbico se reduce en mujeres después de los 40-45 años. Estas modificaciones podrían tener un origen hormonal (DeSilva & Rosenberg, 2017; Meindl et al., 1985).

La sínfisis púbica humana cuenta con una flexibilidad muy limitada, capaz de cierto movimiento en adultos (Becker et al., 2010; Todd, 1920). La articulación es robusta y muy resistente a la compresión y cizallamiento, aunque puede llegar a romperse durante el parto. Es vía la influencia de hormonas presentes en las últimas fases del embarazo y durante el parto que la sínfisis puede ensanchar. Al hacerlo, el canal del parto aumenta sin modificar las dimensiones de la pelvis (Becker et al., 2010; Grunstra et al., 2019; Todd, 1923).

Dado que la pelvis juega un papel crítico en ambos procesos: locomoción y parto, sus componentes óseos muestran un marcado dimorfismo sexual y considerable plasticidad durante la vida adulta (Arsuaga & Carretero, 1994; Fischer & Mitteroecker, 2015, 2017; Kurki, 2011; Tague, 1992; Walrath & Glantz, 1996). Esto es particularmente cierto en la sínfisis púbica. La relajación de los ligamentos de la articulación sacroilíaca y en ensanchamiento de la sínfisis durante el parto son pruebas de ello. Esta relajación se ha demostrado que es posible también en machos gonadotomizados tras la administración de estrógenos y relaxina. Pinell y Crelin (Pinnell & Crelin, 1963) probaron estas hormonas en otras articulaciones mostrando que los condrocitos y osteocitos de la sínfisis púbica cuentan con receptores intracelulares que funcionan al revés que en las demás articulaciones. La ausencia de respuesta al aumento de estrógenos durante la adolescencia tiene por resultado que la osificación de la epífisis y su fusión ocurra de manera independiente a otras zonas del esqueleto durante la madurez sexual.

Viendo la alta variabilidad de la sínfisis en mamíferos, de la que hablaremos más tarde, y la cercana correspondencia entre el tamaño del feto y

del canal del parto, es acertado pensar que la elasticidad de la sínfisis y el tamaño de los neonatos también están estrechamente relacionados. Sin embargo, la bipedestación acentuaría cualquier indicio de inestabilidad en la articulación. Así, mujeres con sínfisis especialmente laxas frecuentan dolor pélvico que puede incluso ser incapacitante (Becker et al., 2010; Heyman, 1932).

El aumento de la capacidad craneal durante el Pleistoceno actuó como filtro selectivo, un canal del parto menos ancho que el diámetro del feto causaría no solo la muerte del neonato, muy probablemente, también la de la madre (DeSilva & Rosenberg, 2017; Lovejoy, Heiple, & Burstein, 1973); las dimensiones craneales del ser humano son mayores (en comparación al canal del parto) que cualquier otro primate (Schultz, 1950). La fusión de ambas caras articulares del pubis no ocurre en individuos sanos, la pequeña separación entre las caras articulares ha sido seleccionada a lo largo de nuestra evolución dado que, incluso si la separación que permiten es de unos pocos milímetros, esta movilidad es un factor crítico durante el parto (Becker et al., 2010; Fischer & Mitteroecker, 2015, 2017). Estos significativos cambios fisiológicos durante la madurez de la sínfisis han ocurrido en los 2 últimos millones de años, periodo en el cual la dramática expansión del cerebro humano tuvo lugar en un homínido completamente bípedo (DeSilva & Rosenberg, 2017).

Esta suposición de se ve apoyada por la sínfisis púbica conservada de AL-288-1, coloquialmente conocida como “Lucy” (Johanson et al., 1982). En este espécimen, la sínfisis púbica presenta un borde completamente formado y una fase madura quiescente que un antropólogo forense hoy en día podría determinar cerca de los 40 años de edad (Figura 7). Sin embargo, la edad de Lucy es más joven de lo que la sínfisis nos indica (el tercer molar ha erupcionado paralelamente con mínimo desgaste). Una estimación razonable sería por debajo de los 30 años.



Figura 7. Pelvis de “Lucy” (tomada de Ruff, Burgess, Ketcham, & Kappelman, 2016).

La región de la sínfisis púbica ha sufrido una retrogresión significativa durante el pleistoceno con una prolongación en la maduración (Meindl et al., 1985). La aparición del típico plano de desarrollo en crestas y valles se retiene hasta la tercera década y hay un marcado retraso en la maduración: aparición de la rampa ventral y nódulos de osificación (Todd, 1920). Después de completar la cara articular mediante la adición de hueso y aparición de la rampa ventral, la sínfisis se somete a una metamorfosis progresiva, descrita por Todd como “cambio de la textura granular a suave”. Tras esto, la sínfisis pasa a ser virtualmente inactiva salvo por la aparición de osteoartritis con actividad osteolítica leve. Se ha sugerido que el cambio de granular a denso cerca del final de la cuarta década de vida representa el vestigio final de la maduración, que corresponde aproximadamente con el final del periodo fértil en las mujeres (Meindl et al., 1985).

Desde una perspectiva evolucionista, la pelvis y, concretamente, la sínfisis púbica, son objeto de dos fuerzas opuestas, es el conocido “dilema obstétrico” (Pavličev, Romero, & Mitteroecker, 2020). En los últimos 10 años se han duplicado las publicaciones sobre la evolución de la pelvis. El estudio de nuevos

restos fósiles ha llevado al el resurgir del dilema obstétrico, antiguamente descrito como un “trade-off” entre parto y bipedestación, pero, ahora, puesto en duda (DeSilva & Rosenberg, 2017; Fischer & Mitteroecker, 2015; Huseynov et al., 2016; Pavličev, Romero, & Mitteroecker, 2020). Fuerzas de cambio como la deriva genética y la termorregulación parecen tener peso también en la forma de la pelvis (DeSilva & Rosenberg, 2017; Grunstra et al., 2019). Respecto a la bipedestación, una pelvis más ancha parece no requerir más energía para andar, al contrario de lo que se creía (Grunstra et al., 2019). El tamaño de la pelvis determina el tamaño del neonato y, por tanto, su estado de desarrollo; esto genera un gran impacto en la estrategia de reproducción humana (DeSilva & Rosenberg, 2017; Fischer & Mitteroecker, 2015, 2017; Grunstra et al., 2019).

Con Lucy se creía que, por rotación transversal, la zancada aumentaría con la anchura de la pelvis, aunque esto no ha sido probado (DeSilva & Rosenberg, 2017; Meindl et al., 1985; Ruff et al., 2016). Otros estudios han hecho evidente que una pelvis más ancha tendría zancadas más grandes, independientemente de si es masculina o femenina. Pero con menor movimiento en el plano sagital y, por ende, mejor eficiencia energética. Una pelvis más ancha no acarrea ninguna desventaja en cuanto a la locomoción, la energía requerida para andar en ambos sexos es similar, las diferencias anatómicas se solucionan con cinéticas distintas (Gruss, Gruss, & Schmitt, 2017). Sin embargo, sí que podrían afectar al centro de gravedad, la facilidad para cargar peso y el suelo pélvico (DeSilva & Rosenberg, 2017; Grunstra et al., 2019).

Algo que apoya la relación entre la forma y tamaño de la pelvis con el suelo pélvico se basa en el dimorfismo sexual. El hecho de que en hombres encontramos una pelvis más estrecha que en hembras, implica que la selección sexual ha favorecido que la pelvis masculina se mantenga estrecha a pesar de que la de la mujer sufra transformaciones de origen hormonal durante su periodo fértil (Grunstra et al., 2019).

Prestando atención al suelo pélvico y asumiendo que una pelvis más ancha supondría un suelo pélvico más débil o vulnerable, la literatura médica sobre desórdenes del suelo pélvico masculino ofrece más información.

El suelo pélvico en machos, al igual que en hembras, está relacionado con el funcionamiento de los esfínteres, siendo crucial en el rendimiento sexual, específicamente, manteniendo la erección. Otros síntomas de un suelo pélvico débil son la incontinencia, prolapsos y posible dolor pélvico. La disfunción eréctil o disfunciones en el orgasmo y/o eyaculación (Cohen, Gonzalez, & Goldstein, 2016) se han relacionado con la debilidad del suelo pélvico. Al mismo tiempo, la ausencia de estructuras como huesos en el pene y un mayor tamaño genital relativo al tamaño del cuerpo (Dixson & Altmann, 2000) hacen más estrictos los requisitos del suelo pélvico humano.

2.3.1 El pubis en otras especies

Las consecuencias físicas de la localización del centro de masa y la dirección de la gravedad en los tejidos blandos y duros dependen de la postura y orientación del individuo. También, variaciones en la forma o velocidad de locomoción están asociadas con diferencias en las fuerzas de inercia y su impacto en la pelvis. Factores como el tamaño relativo del neonato, comportamiento postural y la morfología de la pelvis han tenido gran influencia en la evolución de la pelvis de los mamíferos (Grunstra et al., 2019). La flexibilidad de la sínfisis púbica como diversas adaptaciones evolutivas que facilitan el parto están presente en diferentes mamíferos que también tienen que pasar a un neonato por un canal del parto de tamaños muy similares o, como veremos a continuación, neonatos de mucho mayor tamaño que el del canal del parto. Un ejemplo de este último caso lo presentan las cobayas (Grunstra et al., 2019; Todd, 1923).

Las cobayas se enfrentan a la situación de parir una cabeza con un diámetro de 20 mm cuando el canal del parto durante el embarazo tiene un diámetro de 11 mm (Ruth, 1937). Para hacer posible el parto, el pubis se separa por la sínfisis hasta 23 mm durante las últimas fases del embarazo y el parto (Todd, 1923) y un ligamento aparece en el medio de la articulación.

La aparición de un espacio interpúbico unido por un ligamento no es exclusiva de las cobayas. Otro caso parecido ocurre en algunos grupos de murciélagos (Grunstra et al., 2019). Siendo los únicos mamíferos adaptados al vuelo (Neuweiler, 2000), la mayoría de sus adaptaciones anatómicas son en el tren superior (R. A. Adams & Thibault, 1999; Swartz & Middleton, 2008); esto es conocido como “reversión de la extremidad posterior” y permite a los murciélagos el poder colgarse por las extremidades inferiores cabeza-abajo, al pasar largos periodos en esta posición (incluso más de 12 horas al día), por esto, la presión en su suelo pélvico es muy reducida (Gruss et al., 2017). Una característica notoria de los murciélagos, además de poder volar, es la de dar a luz a neonatos de gran tamaño en comparación al de la madre (hasta un 45%) (Kunz & Kurta, 1987).

La pelvis de los murciélagos tiene un acusado dimorfismo sexual (Chapman, Hall, & Bennett, 1994; Nwoha, 2000; Todd, 1921). En el caso de los machos (la mayoría de las especies) presentan una sinostosis (unión) entre ambas mitades de la pelvis (Crelin, 1969; Nwoha, 2000). En el caso de las hembras, estas carecen de una sínfisis como tal, las caras articulares están separadas y presentan un ligamento de fibrocartilago entre ellas que sufre modificaciones en su longitud y flexibilidad durante el embarazo y el parto. Este ligamento permite agrandar en gran medida el canal del parto (Crelin, 1969; Crelin & Newton, 1969; Grunstra et al., 2019). ¿Cómo ha sido posible que la selección natural favorezca una pelvis abierta? Más cuando esto no ha ocurrido en la gran mayoría de mamíferos con neonatos de gran tamaño. Se han propuesto dos motivos: en primer lugar, la reducida responsabilidad del tren inferior en la locomoción del individuo y, en segundo lugar, la enorme reducción en la presión sufrida por el suelo pélvico debido a su postura (Gruss et al., 2017). Esto hace a los murciélagos muy interesantes como sujeto de estudio para testear la hipótesis del suelo pélvico en humanos.

Un ejemplo contrario a estos lo vemos en cuadrúpedos cuyos sistemas musculoesqueléticos están sometidos a fuertes tensiones, especialmente carnívoros. Grandes felinos como el león o el guepardo son capaces de alcanzar altas velocidades y maniobrabilidad (cambios bruscos de dirección en carrera) además de potentes saltos lo que supone mucha tensión en el esqueleto y el

suelo pélvico. En estos mamíferos, la pelvis está cerrada y los huesos púbicos se fusionan entre sí tanto en machos como en hembras (Figura 8). También se cumple esto en el caso de los canguros (Grunstra et al., 2019).

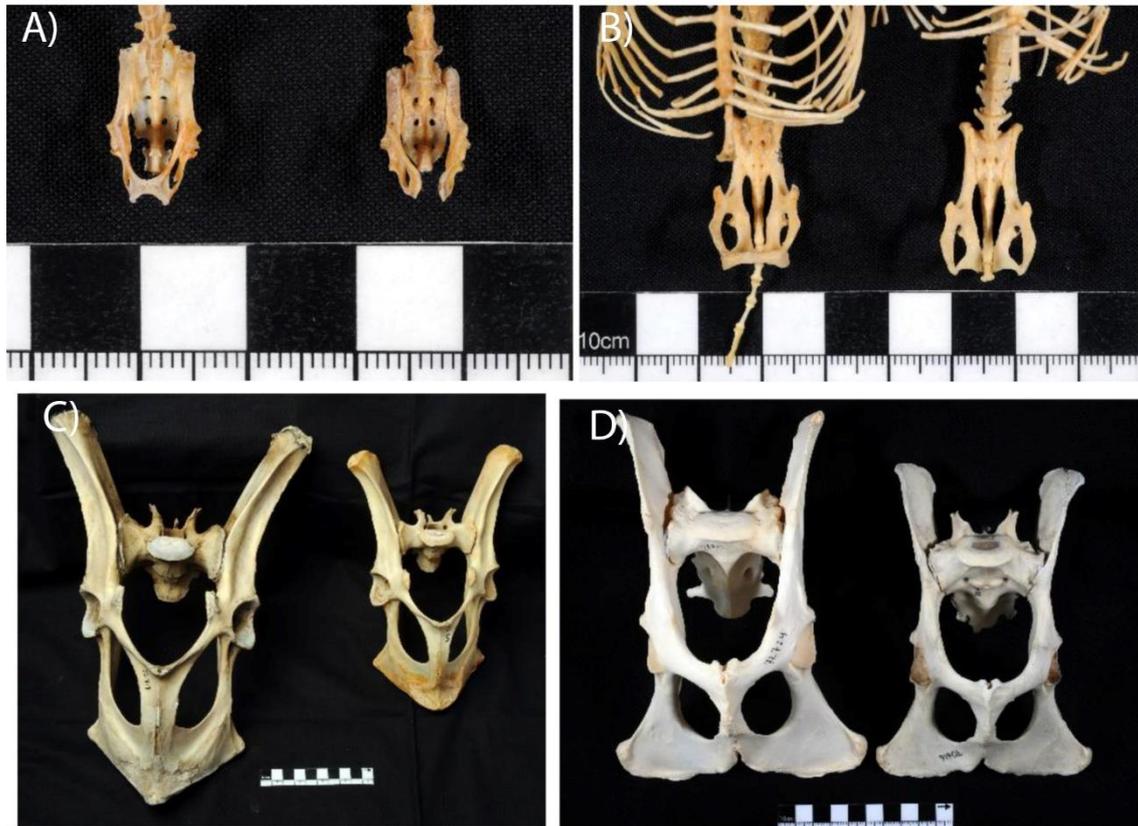


Figura 8. Pelvis de diferentes animales, macho a la izquierda y hembra a la derecha. (A) *Nyctalus noctula* (nóctulo común, Laurasiatheria: Chiroptera), NMW 42194 y NMW 36120. (B) *Rousettus aegyptiacus* (murciélago de la fruta egipcio, Laurasiatheria: Chiroptera), NMW 20840 y NMW 20834. (C) *Macropus Rufus* (canguro rojo, Marsupialia: Diprotodontia), NMW 22717 y NMW 22747. (D) *Acinonyx jubatus* (guepardo, Laurasiatheria: Carnivora), NMW 72724 y NMW 70616. Modificada de Grunstra et al., 2019.

Es factible pensar que la locomoción bípeda en humanos podría no haber sido el principal filtro selectivo de la anchura de la pelvis como se suponía clásicamente, pero sí de la flexibilidad de la sínfisis púbica, ampliamente reducida respecto a pequeños mamíferos con neonatos de gran tamaño relativo (Grunstra et al., 2019). Otro factor que corrobora esta hipótesis es el dimorfismo sexual de la pelvis humana, que se puede considerar pequeño si lo comparamos

con otros mamíferos de similares condiciones obstétricas en las que las hembras cuentan con una pelvis “abierta” (Fischer & Mitteroecker, 2015, 2017).

2.3.2 La evolución en la bibliografía

Creo que es necesario aclarar lo siguiente. Durante la búsqueda de bibliografía sobre la evolución de la pelvis, el pubis y el dilema obstétrico, es muy común encontrar frases como “la pelvis necesitó”, “el tamaño del feto requiere”, “la selección ha actuado en contra de”, etc. En un marco evolutivo darwinista, se debe de evitar terminología determinista, dado que no tiene lugar y la Teoría de la Evolución de Darwin (Darwin, 1859) fue capaz, entre otras muchas cosas, de eliminar el determinismo de la ecuación de la evolución de las especies. Estoy convencido de que la mayoría de los autores de dichas expresiones se consideran darwinistas y que su uso es accidental, pero no por ello dejan de ser errores. Siendo el programa de “Evolución humana. Antropología Física y Forense” bajo el cual esta tesis será presentada, es necesario hacer hincapié en este asunto. Durante la redacción de este texto se ha puesto el máximo cuidado a la hora de no contradecir o mal interpretar una idea tan simple como la evolución, pero, a la vez, tan difícil de aprender e interiorizar.

2.4 LA HISTORIA EN FORENSE

En antropología forense, la determinación de la edad al morir es un parámetro del perfil biológico crucial y realmente difícil de determinar con precisión (Algee-Hewitt, 2017; Konigsberg, Herrmann, Wescott, & Kimmerle, 2008; Steadman, Adams, & Konigsberg, 2006). Esta dificultad es debida a dos razones principales: el envejecimiento (o degeneración post-maduracional) del esqueleto adulto es un proceso complejo dependiente de la interacción de factores genéticos y no genéticos (estrés biomecánico, nutrición, patologías, hormonas, etc.), factores que se combinan de manera única en cada persona (Kemkes-Grottenthaler, 2002). Estas interacciones terminarían determinando

cómo se manifiestan los fenotipos relacionados con la edad en el individuo, creando una gran variabilidad para los mismos indicadores de distintos esqueletos. Además, estos factores van a contribuir al aparente retraso o aceleración del envejecimiento esquelético, resultando en una correlación imperfecta entre la edad cronológica y la edad biológica. Podríamos decir que cada esqueleto tendrá su propio margen de error (Boldsen et al., 2002).

La exactitud y precisión con la que la edad al morir puede ser inferida a partir de indicadores esqueléticos, tiene el potencial de incidir directamente en una identificación positiva. Esta precisión puede ser definida de dos formas: bien la distancia entre un valor estimado y el valor real (Ousley, 1995); o la probabilidad de que un rango de predicción contenga al valor real (Milner & Boldsen, 2012a). Por lo tanto, cualquier método de determinación de la edad dependerá de la repetibilidad entre observadores, esto es, de obtener la misma distancia entre el valor estimado y el valor real y de la anchura del rango o intervalo estimado (Algee-Hewitt, 2017).

La sínfisis púbica es, históricamente, una de las primeras características esqueléticas en ser descritas en el contexto de la determinación de la edad y es la característica que progresa con la edad del individuo más estudiada (Brooks & Suchey, 1990; Todd, 1920). Hay tres razones principales por las cuales usamos la sínfisis del pubis para la determinación de la edad (Garvin & Passalacqua, 2012). La primera es que es la zona anatómica más precisa para este cometido, esto quiere decir que es la zona donde edad biológica y edad cronológica están mejor correlacionadas. La segunda es la facilidad para distinguir, macroscópicamente, sus cambios relacionados con la edad (Meindl et al., 1985; Todd, 1920). La tercera característica importante es el largo periodo de la vida humana que cubre: la metamorfosis del pubis sufre cambios regulares y claros desde la veintena hasta los 50 años de edad (Meindl et al., 1985).

En un informe reciente de buenas prácticas para el análisis de casos forenses, el comité de estimación de la edad del SWGANTh (Scientific Working Group for Forensic Anthropology (SWGANTh), 2013) ha afirmado que los análisis sobre la edad al morir deberían ser realizados “con espíritu de integridad científica” y que “las interpretaciones subjetivas deberían de ser limitadas, deberían usarse métodos científicamente probados cuando es posible y las

debilidades y limitaciones del método usado deberían de ser comunicadas”. La sínfisis púbica es indicador esquelético más fiable y más usado para este cometido (Garvin & Passalacqua, 2012).

2.4.1 Métodos de estimación basados en fases

Debido a que la maduración de la sínfisis púbica puede ser descrita macroscópicamente, la metodología más frecuente para la determinación de la edad al morir con la sínfisis púbica es basada en fases o rangos de edad asignados a las distintas etapas de la maduración de la cara articular (Brooks & Suchey, 1990; Gilbert & McKern, 1973; Todd, 1920). El primer estudio que elaboro un método de determinación de la edad aplicable al contexto forense fue Todd en 1920.

Todd publicó “la sínfisis, una vez que su metamorfosis es comprendida, crea una de las guías más estables para datar a un individuo”. Al menos esto sería así hasta los 40 años de edad, tras lo cual el proceso se vuelve mucho más errático y variable. Si bien es recomendable leer toda su obra sobre el hueso del pubis (Todd, 1920, 1921, 1923, 1930), este es un resumen de sus fases, cómo reconocerlas y qué rangos de edad comprenden:

Primera fase post-adolescente. 18-19 años: Superficie articular escabrosa, atravesada horizontalmente por crestas separadas por marcados surcos; nódulos no osificados (epífisis) fusionando con la superficie, no hay margen delimitante definido, no hay extremidades definidas.

Segunda fase post-adolescente. 20-21 años: La superficie es aún escabrosa, atravesada horizontalmente por crestas y surcos que empiezan a rellenarse cerca del límite dorsal con formación de hueso de textura fina. Pueden aparecer nódulos de osificación fusionándose con la superficie; empieza a desarrollarse la delimitación del margen dorsal, no hay delimitación de las extremidades, se presagia el biselado ventral.

Tercera fase post-adolescente. 22-24 años. La sínfisis muestra una obliteración progresiva del sistema de crestas y surcos; comienza a formarse la

plataforma dorsal; presencia de nódulos de osificación fusionándose; el margen dorsal empieza a definirse gradualmente, el biselado ventral, como resultado de la rarefacción ventral, se vuelve más definido; no hay delimitación de las extremidades.

Cuarta fase. 25-26 años. Gran incremento del área ventral biselada; disminución de la formación de crestas y surcos, definición completa del margen dorsal a través de la formación de la plataforma dorsal; comienza a delimitarse la extremidad inferior.

Quinta fase. 27-30 años. Pequeño o ningún cambio en la cara articular y la plataforma dorsal a excepción de intentos esporádicos y prematuros de formación de la plataforma ventral; la extremidad inferior, así como el margen dorsal, crece en claridad y definición; comienza la formación de la extremidad superior con o sin la intervención de nódulos de osificación.

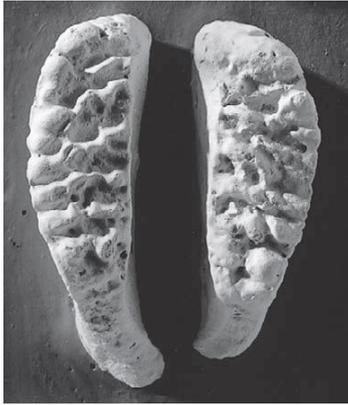
Sexta fase. 30-35 años. Incrementa la definición de las extremidades; desarrollo y posterior finalización de la rampa ventral; retención de la apariencia granulada de la cara articular y aspecto ventral del pubis; ausencia de labiación del margen de la sínfisis.

Séptima fase. 35-39 años. Los cambios en la cara articular y la zona ventral del pubis disminuyen su actividad; comienza a haber excrecencias óseas en las inserciones de tendones y ligamentos, especialmente en el tendón gracilis y el ligamento sacro-tuberoso.

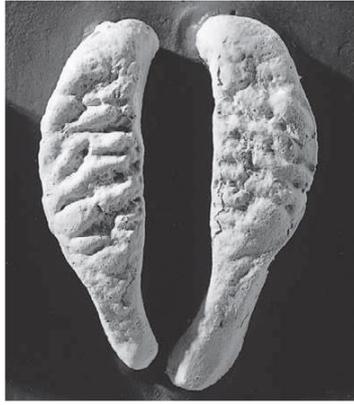
Octava fase. 39-44 años. La cara articular es generalmente lisa e inactiva; la superficie ventral se encuentra también inactiva, el contorno oval está completo o casi completo, extremidades claramente definidas, no hay distinción de un borde en la cara articular, no hay labiación marcada en ninguno de los márgenes dorsal o ventral.

Novena fase. 44-50 años. La cara articular muestra un borde más o menos marcado; borde dorsal uniformemente labiado, margen ventral irregularmente labiado.

Décima fase. 50 años y posterior. La cara articular está erosionada y muestra osificación errática, el borde ventral puede estar más o menos roto, el desfiguramiento incrementa con la edad (Figura 9).



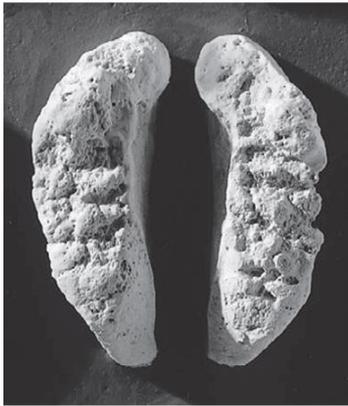
Fase I, 18 - 19 años



Fase II, 20 - 21 años



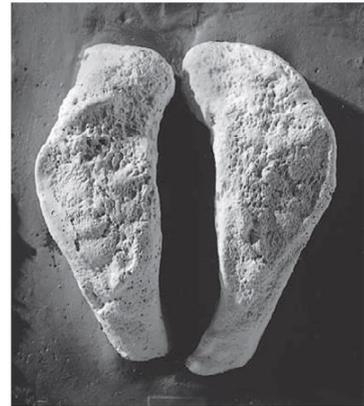
Fase III, 22 - 24 años



Fase IV, 25 - 26 años



Fase V, 27 - 30 años



Fase VI, 30 - 35 años



Fase VII, 35 - 39 años



Fase VIII, 39 - 44 años



Fase IX, 44 - 50 años



Fase X, 50+ años

Figura 9. Método de Todd con sus diez fases representadas: Fase 1 (18-19). Formación en crestas y surcos típicamente adolescente sin signos de márgenes y sin biselado ventral. Fase 2 (20-21). Presagio del biselado ventral con ligeros indicadores del margen dorsal. Fase 3 (22-24). Obliteración progresiva del sistema de crestas y surcos con incremento en la definición de margen dorsal y comienzo de la rarefacción ventral (biselado). Fase 4 (25-26). El margen ventral definido está completo, rápido incremento del biselado ventral y comienzo de la delimitación de la extremidad inferior. Fase 5 (27-30). Comienza la formación de la extremidad superior con un incremento en la definición de la extremidad inferior y posibles intentos esporádicos de formación de la rampa ventral. Fase 6 (30-35). Desarrollo y práctica finalización de la rampa ventral con un incremento en la definición de las extremidades. Fase 7 (35-39). Los cambios en la cara articular y el aspecto ventral del pubis disminuyen su actividad, acompañado por excreciones óseas en las inserciones de tendones y ligamentos. Fase 8 (39-44). Inactividad de la cara articular y aspecto ventral del pubis. Contorno oval y extremidades claramente definidas, pero sin formación de borde o labiaciones. Fase 9 (44-50). Desarrollo del borde en la cara articular con labiación en los márgenes dorsal y ventral. Fase 10 (50 y más). Erosión y crecimiento óseo errático (de origen patológico) en la cara articular con rotura del margen ventral. Tomada de White & Folkens, 2005.

Si bien este método está aún en uso, ha sido y es objeto de diversas críticas. McKern y Stewart (McKern & Stewart, 1957) comentaron que, “si un pubis en particular no coincide cercanamente con una de las fases de Todd, no será posible de datar”, esto lo convierte en un método estático, que pierde la variabilidad de cada característica descrita, por tanto, sólo los pubis cercanos al típico pueden ser datados con precisión razonable. La dificultad del método de Todd radica en los modelos cronológicos de su sistema, originalmente ideados para describir cambios modales derivados de la edad de la sínfisis púbica. Todd tuvo una serie de limitaciones muy serias que a día de hoy todavía intentamos solucionar. El origen de su muestra es, probablemente, la más importante: el sexo, ancestría, grupo socio-económico, el propio tamaño de la muestra, el periodo de origen... Tan solo una fracción diminuta de la variabilidad humana están contempladas en su método y esto hace obligatorio la “adaptación” de las fases a otras poblaciones humanas para las cuales los cambios morfológicos en

el pubis ocurren en ritmos (Meindl et al., 1985; Soto, Algee-Hewitt, Bravo Morante, Slice, & Steadman, 2018).

A pesar de las modificaciones y reestructuraciones de las fases, Meindl y colaboradores (Meindl et al., 1985) aseguraron que el método de Todd es más preciso incluso que técnicas más recientes a la suya. En su trabajo, Meindl y sus colaboradores, reestructuraron las fases que Todd había descrito en cuatro fases:

Fase preepifiseal (Todd I-V): Es la fase modal para edades entre 20 y 29 años en ambos sexos. La sínfisis muestra crestas bien marcadas. A los 25 años la mayoría de las crestas han sido sustancialmente reducidas. El remodelado de la cara articular para formar las dos hemicaras de McKern y Stewart comienza alrededor de los 25 (McKern & Stewart, 1957). Algunas de las características más determinantes son: Crestas pronunciadas 18-25, moderado a leve 24-37; formación activa de la rampa ventral, 24-37; la edad mínima para distinguir la extremidad inferior, 25; edad máxima para distinguir la extremidad inferior, 29; presencia o fusión de nódulos de osificación sin rampa asociada, 21-30. La metamorfosis progresiva de la cara articular durante este periodo es, relativamente, de fácil interpretación y evaluación.

Fase epifisaria activa (Todd VI): El evento modal de esta fase es la formación activa de la rampa ventral. Dado que la edad a la que se forma la rampa es variable, el periodo entre 30 y 35 años es claramente modal por su aparición y finalización como Todd describió. También es importante mencionar que es a madurez general del pubis debería de ser la característica primordial para su datación.

Fase Postepifisial inmediata (Todd VII): Es principalmente el cambio de textura de irregular y granular a grano fino o denso. Esta transición ocurre en el periodo entre 36-40 años. Sin embargo, hay excepciones. Por tanto, si bien es un buen indicador de la edad, no debería de usarse como criterio único. Evidencias de la formación reciente de la rampa ventral continúan en forma de un surco longitudinal bajo la rampa que corre a lo largo de la cara púlica interna. En resumen, las fases arquetípicas de Todd comprendidas entre los 30 y 39 años son sustancialmente correctas y precisas.

Fases predegenerativa y degenerativa (Todd VIII-X): La obliteración de la evidencia de la formación, fusión y final remodelación de la epífisis señala el final del papel del pubis como indicador fiable de la edad al morir. La actividad ósea en la articulación ha disminuido drásticamente y cualquier modificación posterior no está ligada al proceso de maduración. Al envejecer, la precisión de la determinación se vuelve directamente proporcional al número de indicadores independientes disponibles.

Posteriormente, Suchey y Brooks (Brooks & Suchey, 1990) vuelven a modificar el sistema de fases de Todd, dejando 6 esta vez. Una diferencia importante respecto a los sistemas anteriores es que las 6 fases de Suchey y Brooks se superponen, esta vez, la separación entre fases es más difusa y permite estadios intermedios:

Fase I (15-23 años). La cara articular presenta una superficie en crestas y surcos que, generalmente, se extiende hasta incluir el tubérculo púbico. Las crestas horizontales están bien marcadas y puede empezar a verse biselado ventral.

Fase II (19-34 años). La cara articular aún puede mostrar crestas. Se delimitan las extremidades inferior y/o superior, esto puede ocurrir con o sin nódulos de osificación.

Fase III (21-46 años). La cara articular presenta la extremidad inferior y la muralla ventral en proceso de formación o finalizadas. La cara articular es generalmente lisa, pero puede continuar mostrando algunas crestas.

Fase IV (23-57 años). La cara articular es lisa y está formada por hueso de grano fino, aunque aún puede quedar rastro del sistema de crestas y surcos. Por lo general, el contorno ovalado de la sínfisis se completa en esta etapa.

Fase V (27-66 años). La cara articular está rodeada completamente por un borde, presentando una ligera depresión de la superficie articular respecto al borde. Pueden encontrarse labiaciones del hueso en el borde dorsal.

Fase VI (34-86 años). La cara articular puede mostrar una depresión continua a medida que el borde se erosiona. La forma de la superficie articular es a menudo irregular en esta etapa (Figura 10).

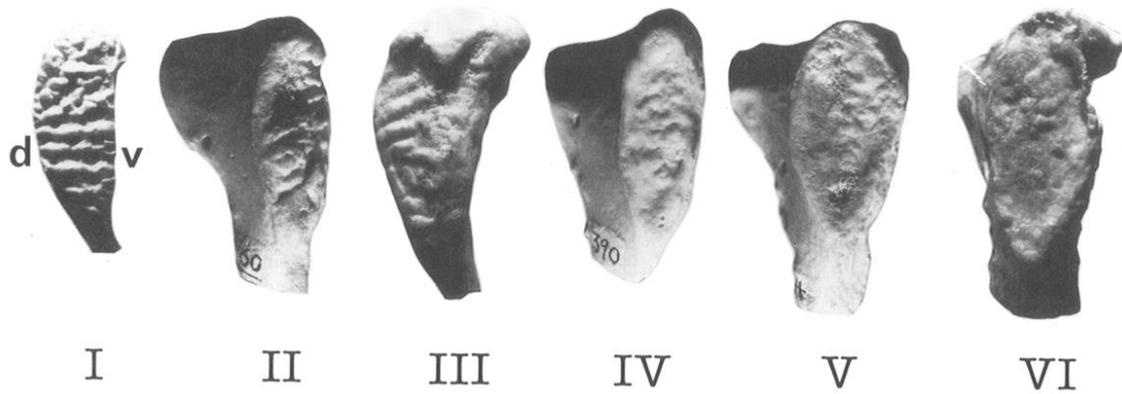


Figura 10. Método de seis fases de Suchey y Brooks (tomada de Brooks & Suchey, 1990).

Estos métodos establecen rangos de edad bastante amplios y la capacidad de estos de estimar la edad de un individuo en un contexto forense es reducida (Figura 11). A su vez, siguen siendo elaborados con muestras concretas, normalmente pertenecientes a poblaciones distintas a las de los restos esqueléticos que tratamos de identificar, haciendo la determinación de la edad aún más incierta. Podemos especular acerca del motivo por el cual las últimas fases de Suchey y Brooks engloban rangos de edad tan amplios. La muestra de pubis utilizada provenía, en parte, de autopsias de personas sin hogar y de condiciones socio-económicas adversas, frecuentemente asociadas con el abuso de alcohol y otras drogas. El abuso del alcohol podría estar relacionado con deformaciones en la cara articular del pubis, haciendo que la estimación de la edad sea mucho más difícil de realizar. Con una muestra como esta, algunos individuos podrían haber ampliado el rango de predicción de las últimas fases. De nuevo, esto es solo una conjetura.

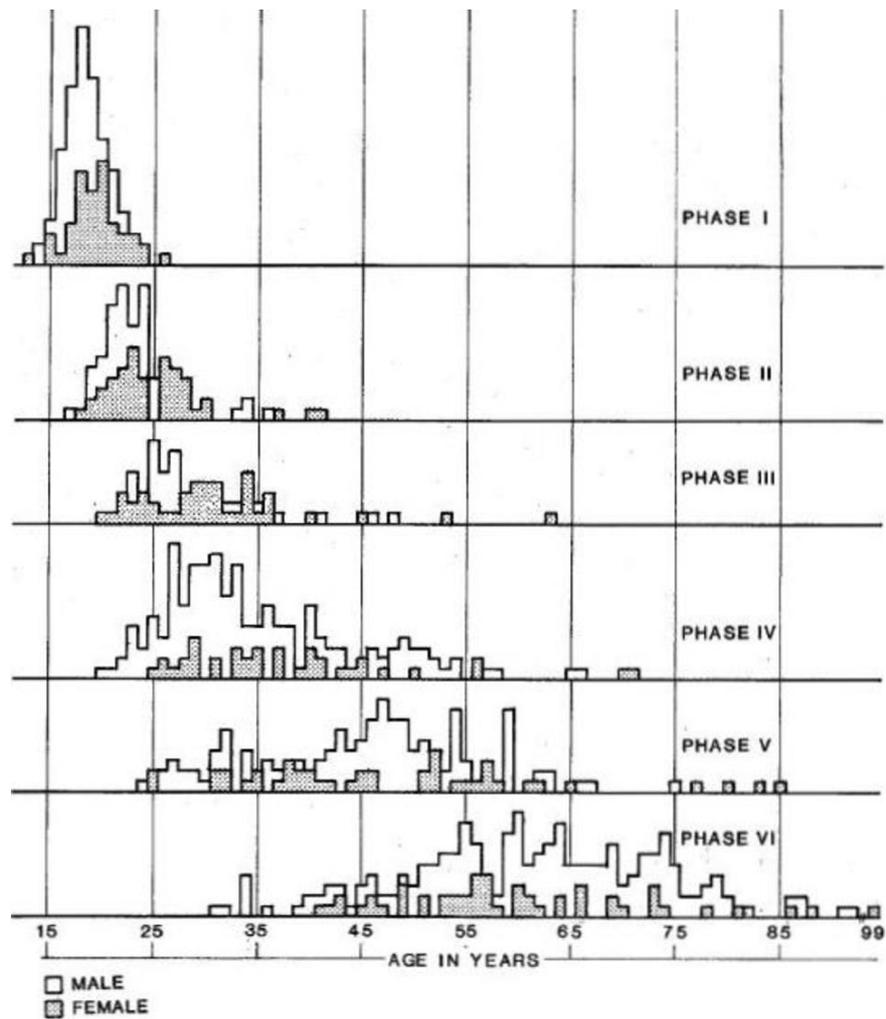


Figura 11. Histogramas de edad de las fases de Suchey y Brooks para hombres (“male”) y mujeres (“female”). Tomada de Brooks & Suchey, 1990.

A pesar de esto, Garvin y Passalacqua (Garvin & Passalacqua, 2012) publicaron que, independientemente de los problemas derivados de la subjetividad y los amplios errores observados en los métodos basados en fases, casi la mitad de los expertos entrevistados preferían el uso de la sínfisis púbica y, más concretamente, el método de Suchey y Brooks, en base a la experiencia y pericia personal que por la aplicación del método en sí mismo.. Sin lugar a dudas, la comparación macroscópica de la muestra con el modelo o fotografía de una fase es barato, rápido y “sencillo”

2.4.2 Métodos de estimación computacionales

Avances como la obtención de imágenes 3D, ya sea con escáneres de superficie, fotogrametría o tomografías computarizadas (CT) (Bastir et al., 2017; Bates, Manning, Hodgetts, & Sellers, 2009; Bruner & Bastir, 2008; Conroy et al., 1998; Fajardo & Müller, 2001; Guidi, Russo, & Angheluddu, 2014; Mikhail, Bethel, & McGlone, 2001; Niven, Steele, Finke, Gernat, & Hublin, 2009; Spoor, Wood, & Zonneveld, 1994; G. W. Weber, 2015; Zollikofer, de León, Martin, & Stucki, 1995), han facilitado el surgimiento de nuevas metodologías que solventan algunos de los problemas expuestos hasta ahora. Algunos de los métodos computacionales que afrontan el problema con nuevos puntos de vista son los siguientes:

En 1999, E. Pasquier et al. Propusieron (Pasquier et al., 1999) un sistema de predicción de la edad al morir cuantificando parámetros correlacionados con la edad obtenidos desde CTs de la sínfisis púbica. Para ellos, también era de vital importancia el preservar la integridad de la muestra (Figura 12).



Figura 12. Modelos de referencia creados a partir del método de Pasquier et al. Tomada de Pasquier et al., 1999.

Los parámetros macroscópicos que cuantificaron son las labiaciones del borde dorsal, profundidad de las crestas y el desarrollo de la rampa ventral. Otros parámetros que el uso de CTs les permitieron cuantificar fueron la textura

trabecular del hueso y distancias anatómicas lineares medidas utilizando descriptores invariables. Al final, se hizo una regresión de 18 variables y la edad conocida (sólo para esqueletos masculinos) obteniendo una estimación de la edad más certera que con el método de Suchey y Brooks (Brooks & Suchey, 1990). Sin embargo, las posibles mejoras que se incluían en sus conclusiones no llegaron a hacerse. Una regresión múltiple de 18 variables donde la posición del pubis durante el cálculo de parámetros puede incluir gran cantidad de ruido no es un método utilizado a día de hoy. Este es un buen ejemplo de un modelo preciso que, por cuestiones prácticas y su aplicabilidad, no ha sido adoptado.

El análisis transicional de J.L. Boldsen (Boldsen et al., 2002) utiliza diferentes regiones del esqueleto para diferentes rangos de edad, entre ellos la sínfisis del pubis. Esta metodología si se utiliza actualmente y establece claramente que el uso de un solo hueso no cubre el rango de edad completo de los seres humanos.

Beatrix Dudzik y Natalie R. Langley en 2015 (Dudzik & Langley, 2015) presentaron un sistema de puntuaciones basado en componentes para individuos hasta los 40 años de edad. Los parámetros relacionados con la edad fueron divididos y puntuados a fin de “romper” con el establecimiento de fases arquetípicas. El resultado fue un árbol de decisión basado en la puntuación dada a estos distintos parámetros.

Sería en 2015 cuando Bridget F.B. Algee-Hewitt y Dennis E. Slice publicaron “Modeling Bone Surface Morphology: A fully Quantitative Method for Age-at-Death Estimation Using the Pubic Symphysis” (Slice & Algee-Hewitt, 2015). Un método puramente computacional que puntúa cada pubis y asigna una edad a esta puntuación. Todo el proceso es llevado a cabo automáticamente por un software llamado “For Age”, desarrollado por Detelina Stoyanova. El único requerimiento es cargar la sínfisis de un pubis en 3D y orientarla acorde con las indicaciones que el propio software te da. En cuestión de segundos, la edad al morir es estimada por el software. La versión de 2015 fue mejorada en los años posteriores (D. Stoyanova, Algee-Hewitt, & Slice, 2015; D. K. Stoyanova, Algee-Hewitt, Kim, & Slice, 2017) y, a día de hoy, se ha validado con otras muestras y se ha puesto a prueba contra uno de los mayores problemas de los métodos

basados en fases: la simetría (D. K. Stoyanova, Algee-Hewitt, Kim, & Slice, 2019). No está completamente establecido qué hacer cuando cada hemicara de la sínfisis corresponde a una fase distinta. Calcular la media, usar la cara izquierda o la que sea más “vieja” son las soluciones más comunes. Con *For Age* se ha reportado que este problema prácticamente desaparece y es invariable a que hemicara utilices.

For Age facilita enormemente su propia implementación al reducir el tiempo de análisis y simplificar la interpretación de los resultados. Es gratis y multiplataforma. Cualquier método computacional que requiera sustituir al método más utilizado hoy en día (Suchey y Brooks) debe de cumplir con estos requisitos. No sólo debe tener mayor precisión, sino que también deber ser fácil de utilizar, rápido, y gratuito.

2.4.3 Método de estimación: *For Age*

La última versión de este software calcula tres puntuaciones en cada pubis y da una edad estimada por cada uno de estos valores y sus combinaciones (Slice & Algee-Hewitt, 2015; D. Stoyanova et al., 2015; D. K. Stoyanova et al., 2017). Al final, cuentas con 5 estimaciones, dos de ellas siendo una combinación de las otras tres (y, por tanto, más precisas).

Las tres características que se están puntuando son:

1. Puntuación SAH (Slice and Algee-Hewitt): mide la varianza de la sínfisis del pubis a fin de capturar el alisamiento gradual de la superficie asociado con la edad. Un valor alto está asociado a individuos más jóvenes (Slice & Algee-Hewitt, 2015).
2. Puntuación TPS (Thin Plate Splines): mide la cantidad mínima de energía de torsión (BE) requerida para transformar una placa perfectamente plana e infinitamente delgada en la superficie de la sínfisis del pubis a puntuar. Tanto este método como el SAH son capaces de seguir la transición del pubis joven marcado por crestas y surcos a un pubis plano, de edad más avanzada.

3. Puntuación de la curva ventral (VC): mide la curvatura del margen ventral, capturando la formación progresiva del anillo que rodea la sínfisis y su posterior erosión (Figura 13).

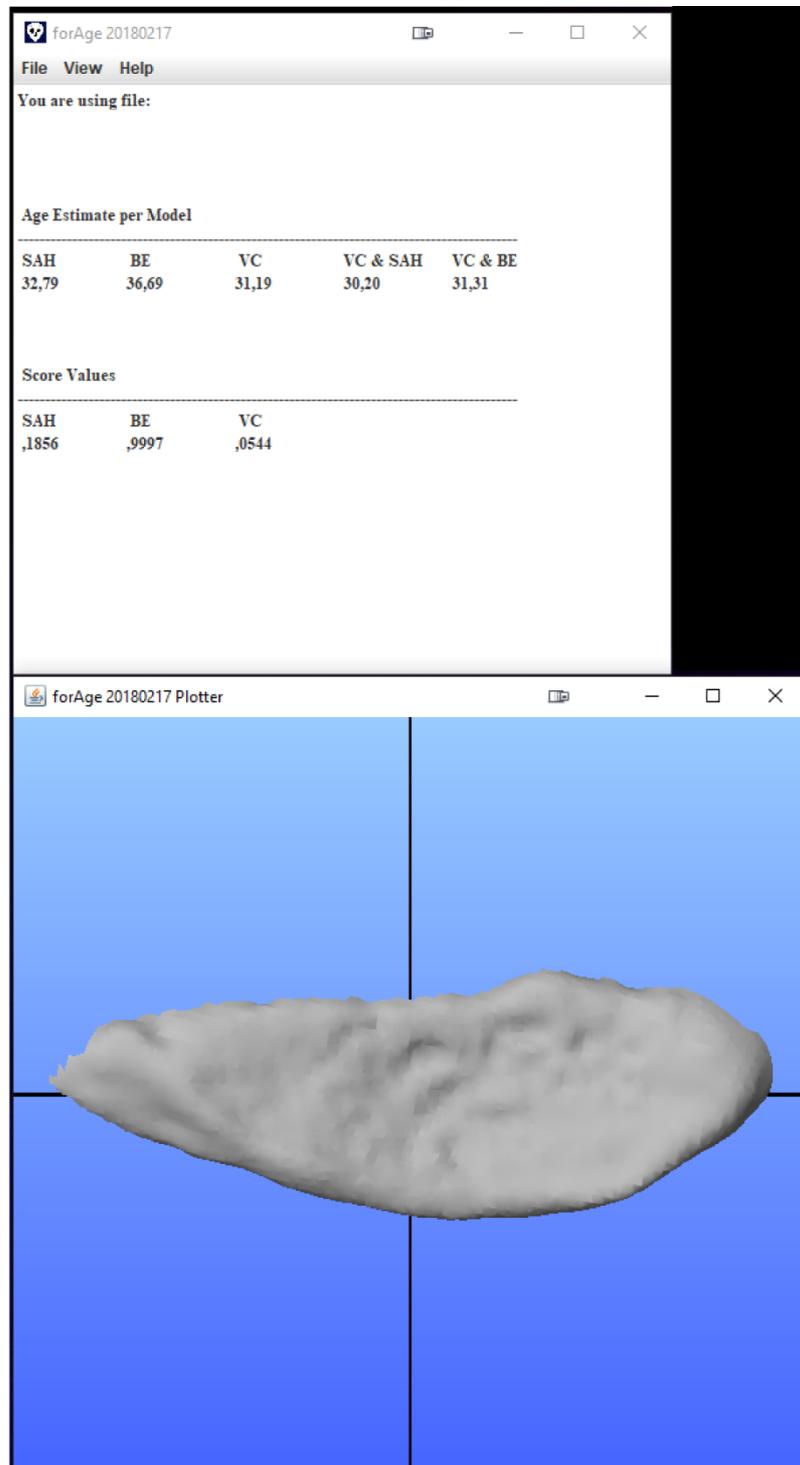


Figura 13. Ejemplo del uso del software For Age. La sínfisis del pubis se orienta con el margen ventral hacia arriba y, automáticamente, muestra los valores obtenidos para las distintas características, así como la edad estimada.

En Stoyanova 2017 podemos comprobar que el mayor coeficiente de determinación respecto a la edad es la puntuación SAH ($R^2 = 0.478$) con un error cuadrático medio (RMSE) de 14.15 años. Esto varía según la muestra, pero los errores en la estimación son muy parecidos.

El hecho de que esté siendo probado con diversas muestras (Kotěrová, Velemínská, Cunha, & Brůžek, 2019; Soto et al., 2018) sin duda mejorará sus capacidades y su implementación en antropología física.

Capítulo 3

Objetivos

3. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es crear un modelo o método de estimación de la edad al morir basado en la sínfisis del pubis que cumpla con cuatro requisitos:

1. Ser lo más independiente posible de la experiencia y subjetividad de un experto.
2. No estar basado en fases creadas arbitrariamente, debe de ser capaz de convertir un pubis en un valor y este valor en una edad más probable.
3. Ser sencillo de utilizar, potencialmente automático e implementable en un paquete de software.
4. Que produzca estimaciones competentes respecto a los métodos publicados hasta la fecha.

Es importante aclarar que no valdría un método, por bueno que fuera, que no vaya a ser utilizado en antropología física. Por este motivo se utiliza software libre en todo el proceso y siempre buscando la sencillez y una fácil interpretación de los resultados. El método de Suchey y Brooks (Brooks & Suchey, 1990) es tan utilizado por sus buenos resultados, por su sencillez y rapidez. Para que un método pueda sustituir o complementar a este, debe de tener unos requerimientos similares en cuanto a recursos y tiempo.

Capítulo 4

La muestra

4.1 LA COLECCIÓN

La muestra para este estudio está compuesta por tres niveles, siendo los dos primeros comunes en los cuatro experimentos descritos a continuación y un tercer nivel específico de cada experimento.

El primer nivel de la muestra es la colección de pubis del Laboratorio de Antropología Física de la Universidad de Granada, de origen forense. Estos pubis han sido donados a lo largo de las últimas décadas por el Instituto de Medicina Legal de Granada. Cada pubis, anonimizado, cuenta con información detallada sobre el sexo, ancestría, posibles patologías y la edad al morir del individuo. La colección femenina está compuesta por 123 individuos y 245 pubis individuales y la masculina, aun en crecimiento, constaba de 230 individuos (440 pubis individuales) en el comienzo de este estudio. La edad de la colección oscila entre los 14 y los 89 años; todos los rangos de edad pertenecientes a las fases de Todd están representados por, al menos, 10 individuos. Todos los individuos fallecieron entre los siglos XX y XXI.

La muestra física corresponde al primer nivel de la muestra. Los procesos de limpieza de los huesos, individualización, anonimizado, creación de base de datos y mantenimiento de la colección son anteriores a mi inclusión en el laboratorio, pero me consta que han sido llevados a cabo siguiendo los protocolos establecidos por el laboratorio y cualquier indicio de error o confusión, así como pubis con algún tipo de daño que pudiesen afectar a la calidad del estudio fueron descartados.

El segundo nivel de esta muestra corresponde a la digitalización de los pubis. Desde el principio, la intención de este estudio era la elaboración de un método computacional de estimación de la edad y para ello se necesita transformar la muestra física en digital y, en este caso, en 3 dimensiones. Para ello se utilizó un escáner de superficie de Artec group, el Artec Spider. El proceso de escaneo, así como sus ventajas e inconvenientes es descrito más adelante.

El tercer nivel de la muestra es exclusivo de cada uno de los cuatro experimentos realizados y será descrito en profundidad en cada uno de ellos.

Debo aclarar que la colección femenina será utilizada con cautela con el fin de estimar la edad al morir por varias razones:

1. Su desarrollo durante la vida sigue un ritmo ligeramente diferente al del pubis masculino (Gilbert & McKern, 1973; Meindl et al., 1985; Todd, 1920)
2. Durante el parto, existe la posibilidad de que algunas marcas queden impresas en el pubis, estas deberían de ser fácilmente identificables por un antropólogo físico pero el modelo a desarrollar es computacional y no puedo asegurar (al menos no con mi nivel de conocimiento) que estas marcas no afecten a la estimación de la edad (Figura 14). Además, su aparición es irregular y la colección no cuenta con información acerca del número de partos de cada individuo (Maass & Friedling, 2016; McArthur, Meyer, Jackson, Pitt, & Larrison, 2016; Putschar, 1976; Sutro, 1936).
3. Sabiendo esto y añadiendo que el tamaño de la muestra femenina es casi la mitad que la masculina, tiene más sentido en un trabajo exploratorio utilizar la muestra más grande y regular.

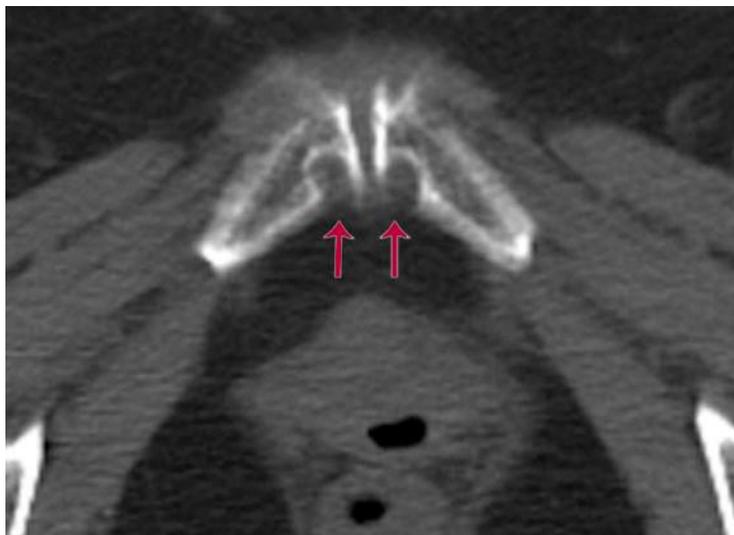


Figura 14. Ejemplo de las marcas que el parto pueden dejar en el pubis (modificado de McArthur et al., 2016).

Debido a esto, en los casos en los que se utilicen ambas muestras, será siempre por separado con modelos diferentes.

4.2 DIGITALIZACIÓN DE LA MUESTRA

Los primeros estudios que utilizaron técnicas de imagen médica como tomografías computarizadas datan de finales de los '90 (Pasquier et al., 1999). Estas técnicas permiten estudiar estructuras anatómicas y el interior de los huesos de un modo no invasivo, lo cual ha supuesto un gran aumento en el número de estudios en antropología física que utilizan estas técnicas. Por otro lado, los escáneres de superficie se han vuelto muy populares durante la última década junto a la fotogrametría por volverse más baratos y precisos con el tiempo, favoreciendo la creación de colecciones virtuales y forzando un cambio de paradigma en el estudio de la morfología en antropología y paleontología (Friess, 2012) debido a la mayor facilidad de acceso e intercambio de colecciones. En un momento económico difícil en el cual el acceso a becas y proyectos se ve más limitado, así como la posibilidad de viajar para visitar otras colecciones, la digitalización de estas garantiza el fácil acceso a, por ejemplo, estudiantes de doctorado.

En el campo de la antropología, esta “revolución” es conocida como “antropología virtual”. Esto ha supuesto un enorme incremento en la publicación de estudios sobre desarrollo y evolución, antes mucho más difíciles de realizar e interpretar (G. W. Weber, 2015; G. W. Weber et al., 2001). A su vez, la insistencia de los investigadores por mantener software de acceso libre ha facilitado este proceso.

Para llevar a cabo la digitalización de una colección, hay que tener en cuenta tres factores de los que dependerá no solo la digitalización en sí, sino también: precio, tiempo y calidad.

Transformar un objeto físico, en este caso un hueso, en un modelo tridimensional puede llevarse a cabo de diferentes maneras. Algo que hace tres décadas era un proceso lento y costoso, hoy puede llevarse a cabo con la cámara de tu smartphone. Tanto instrumentos de imagen médica como CTs como escáneres de uso habitual en la industria pueden llevar a cabo la digitalización de la colección. Para elegir qué aparato usar, nos fijaremos en el precio de este (más el de su puesta en marcha, mantenimiento y la necesidad

de un experto), el tiempo requerido para la digitalización de la colección y el resultado.

Dado que la colección está formada por huesos ya limpios y aislados del resto del esqueleto, el uso de imagen médica carece de sentido, dado que su principal punto fuerte es la posibilidad de segmentar y aislar el área de interés, algo que ya está hecho físicamente en la muestra que se ha utilizado. Además, sus costes son altos y, para una calidad de detalle alta, el tiempo requerido para la digitalización sería extremadamente alto. Carezco de datos empíricos más precisos, pero la digitalización vía CT estaba descartada desde el principio por lo ya mencionado.

La calidad del modelo 3D, su resolución, es el factor más relevante. De nada sirve un método barato o rápido si el modelo 3D resultante no ha capturado la información biológica que necesitamos. Durante la Introducción se han definido características que tienen que estar presentes en nuestra muestra digitalizada: porosidad, crestas, surcos, los bordes, textura del hueso, etc. Desde hace años, el Laboratorio de Antropología Física de la Universidad de Granada ha sido pionero en el uso de escáneres 3D, pertenecientes hasta entonces al campo de la ingeniería automovilística, para la digitalización de muestras óseas.

Si no es necesaria la estructura interna del hueso a estudiar, el uso de un escáner de superficie para elaborar un modelo tridimensional respecto al CT es más rápido, sencillo, barato y de gran (incluso superior) resolución. Para la digitalización de esta muestra se utilizó el escáner de superficie Artec Spider, de Artec group (Kersten, Przybilla, & Lindstaedt, 2016). Este escáner está especializado para muestras de pequeño tamaño (menos de 15 centímetros de diámetro) donde se requiera de una alta resolución de la textura (hasta 0.1 mm) y precisión de la malla de puntos (0.05 mm).

Artec Spider (Figura 15), utilizando varias cámaras alineadas y un flash de luz, es capaz de captar puntos individuales del objeto que quieres digitalizar, estos puntos se conocen como la malla de puntos y de su densidad depende la calidad del modelo. Estos puntos se unirán en polígonos o caras, replicando el pubis a la perfección. Con un tiempo de escaneo inferior a los 3 minutos y un

proceso de postproducción inferior a los 5 minutos, Artec Spider es el escáner de elección para esta muestra.



Figura 15. Escáner de superficie Artec spider utilizado para digitalizar la muestra.

El proceso de escaneo de esta colección ha sido llevado a cabo siguiendo el manual que Artec provee rigurosamente, siguiendo tres pasos:

1. Asegurar el pubis con una pinza al centro de una mesa giratoria
2. Con Artec Spider en el rango óptimo de temperatura, se procede a escanear el hueso manteniendo la distancia requerida para el mejor resultado. Con el escáner estático, se procede a girar la mesa giratoria para cubrir toda la superficie del pubis. Si fuera necesario cubrir algún detalle o zona, se movería el escáner para asegurar que el hueso está completo.
3. Utilizando el software Artec Studio 11, en visión ortográfica, se lleva a cabo el proceso de registro, limpieza del modelo (eliminando la pinza y la mesa giratoria) y fusión de los puntos en los polígonos que formarán la superficie de nuestro modelo. Tras lo cual, todos los pubis han sido exportados a un tipo de archivo compatible (en este caso, .ply). La textura (color real del hueso) no era necesaria para este estudio. El color del hueso puede llevar a engaño en más ocasiones que la información que

aporta y lo que se necesita para los análisis posteriores es únicamente la superficie el pubis (Figura 16).



Figura 16. Software del Grupo Artec, Artec Studio 11. Podemos visualizar que a la derecha se encuentran los modelos 3D cargados en el programa y a la izquierda están las herramientas necesarias para realizar desde la digitalización hasta el postprocesado y exportación del archivo. En la zona inferior se guarda un log con todos los pasos realizados durante la sesión.

Capítulo 5

Probando For Age

5.1 ANTES DE USAR FOR AGE

El desarrollo de este software fue lo que inspiró este trabajo. Un grupo de investigación fue capaz de pensar en un método capaz de estimar la edad al morir con buenos resultados, de forma rápida, sencilla y gratuita (Slice & Algee-Hewitt, 2015; D. Stoyanova et al., 2015; D. K. Stoyanova et al., 2017). Para saber si tiene margen de mejora y cómo de bien se adapta a la muestra de la colección de la que dispongo, el primer paso es estimar la edad de mi colección utilizando For Age para establecer una “marca a batir”.

Para que este software funcione correctamente, necesitamos aislar la sínfisis púbica del resto del pubis y orientarla correctamente (Kim, Algee-Hewitt, Stoyanova, Figueroa-Soto, & Slice, 2019). Para ello, se utilizó el propio software de Artec (Artec Studio 11) con el cual realicé la postproducción de los modelos tridimensionales de los pubis (Figura 17).

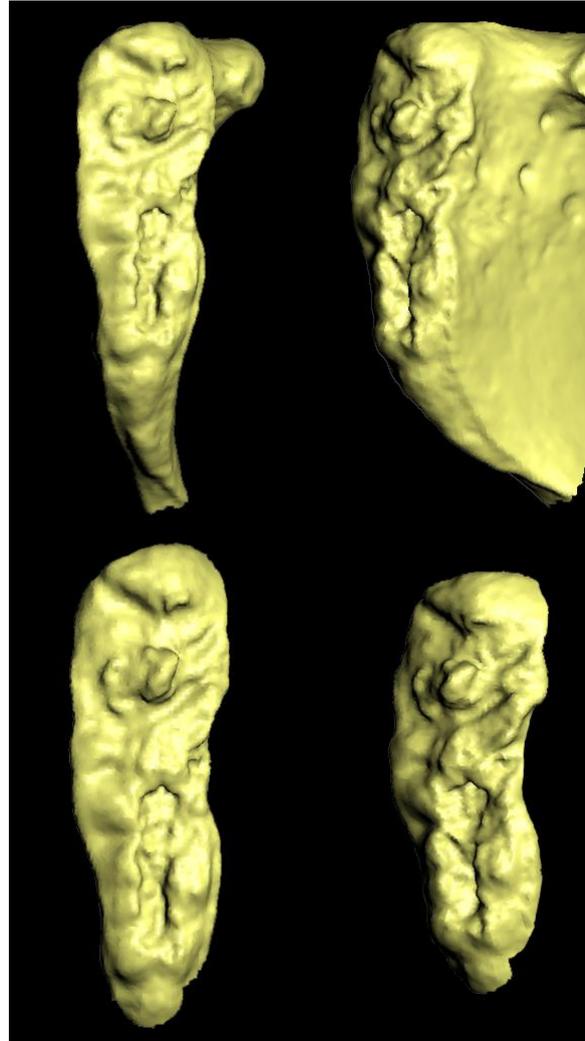


Figura 17. Proceso de recorte del pubis. En la fila superior se puede ver el pubis sin tratar, en la fila inferior se puede ver la cara articular aislada del resto del pubis. Es importante que los bordes ventral y dorsal sean tan regulares y “suaves” como sea posible.

En los artículos donde introducen For Age así como en los estudios que han replicado sus resultados en otras muestras se puede ver que uno de los factores que podrían introducir mayor ruido es cómo se aísla la sínfisis púbica (Kim et al., 2019; Soto et al., 2018). En los casos en los que el individuo ha desarrollado el anillo externo y que los bordes dorsal y ventral están bien delimitados, es sencillo. Pero, en individuos jóvenes, es fácil cometer errores.

La puntuación de la curva ventral (CV) es especialmente susceptible a este paso. Para evitar cortar de más o no lo suficiente, se aislaron las caras articulares de toda la muestra sin eliminar el resto primero. Tras ello se cargó la

textura (color real) del hueso para comprobar que el borde no era dañado o modificado en ningún caso y que el aislamiento era preciso.

Una gran ventaja que tiene el escáner Artec Spider respecto a la mayoría de su competencia es la densidad de la nube de puntos que produce. Cuando se eliminan puntos para aislar la sínfisis, se pueden generar esquirlas dado que esos puntos se unen entre sí como polígonos. Al contar con una densidad de puntos alta, estos polígonos son de pequeño tamaño y no aparecen esquirlas pronunciadas.

Tras recortar toda la muestra, se procedió a estimar la edad de cada individuo con el software For Age, siguiendo las indicaciones que requiere en el proceso. Las puntuaciones para cada factor y su edad asociada fueron exportados a R (R-Core Team, 2017) para su posterior análisis estadístico.

5.2 RESULTADOS DE FOR AGE

Tras aplicar el software For Age en la muestra en todo su rango de edad, obtuvimos las correlaciones entre la edad estimada y la real para los tres indicadores. SAH mostró la correlación más alta con 0,39 puntos (Figura 18), la energía de torsión (ET) obtuvo 0,305 (Figura 19) y la curva ventral (CV) 0,192 (Figura 20). Al calcular la raíz del error cuadrático medio para comprobar cómo de buenas son las estimaciones, obtuvimos para SAH 17 años, energía de torsión 19 años y CV 15 años.

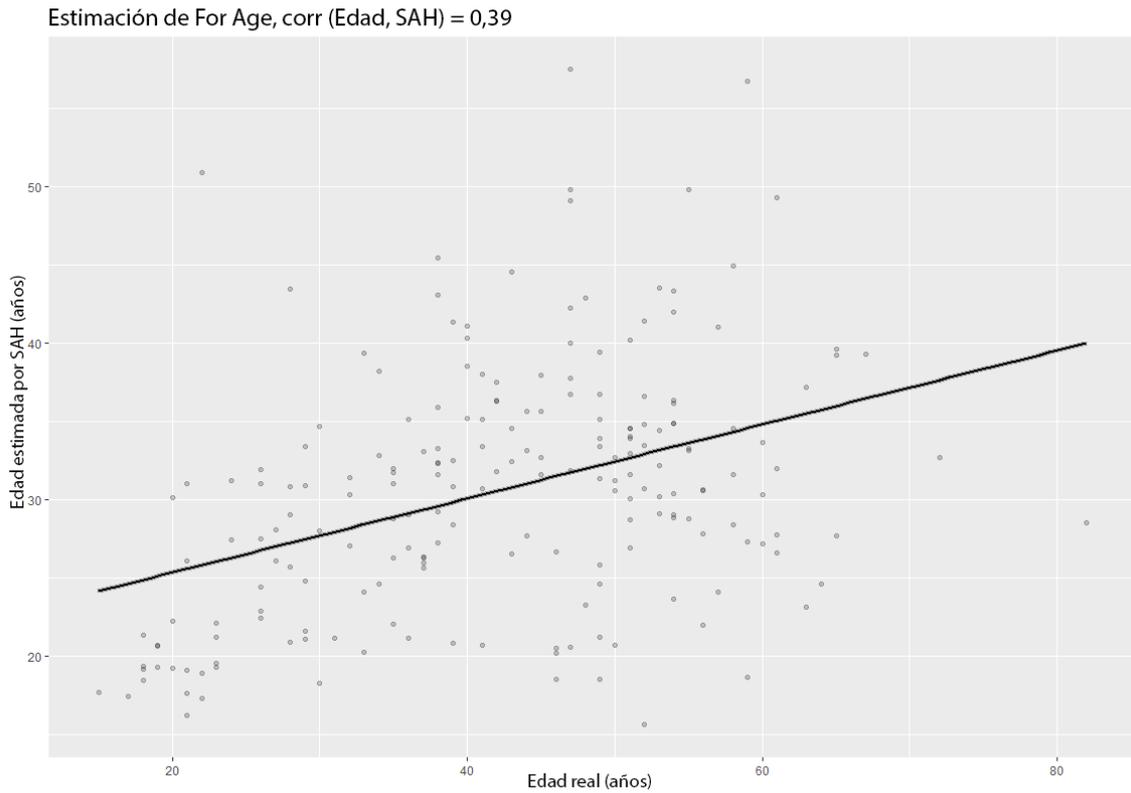


Figura 18. Regresión lineal de la edad real de los individuos de la muestra contra la edad estimada por el parámetro SAH de For Age. Podemos ver una gran dispersión de los puntos que crece con la edad, haciendo la estimación menos precisa a edades avanzadas.

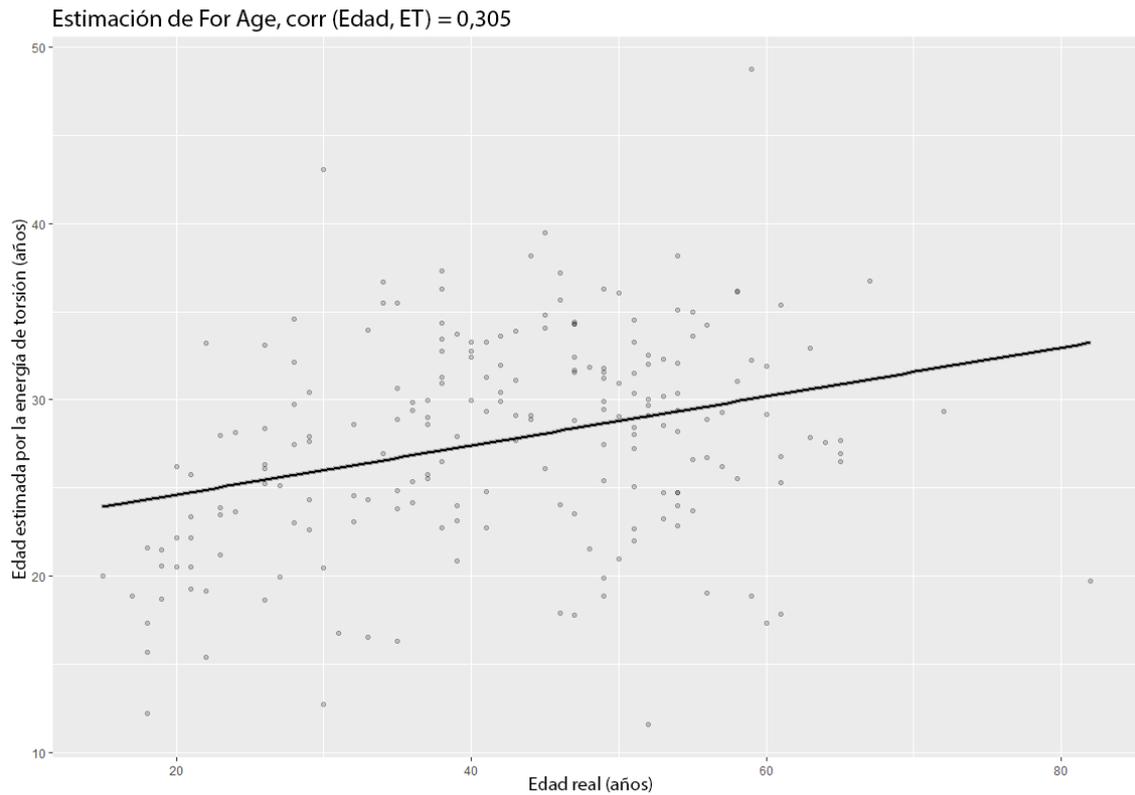


Figura 19. Regresión lineal de la edad real de los individuos de la muestra contra la edad estimada por el parámetro de la energía de torsión (ET) de For Age. Podemos ver una gran dispersión de los puntos que crece con la edad, haciendo la estimación menos precisa a edades avanzadas.

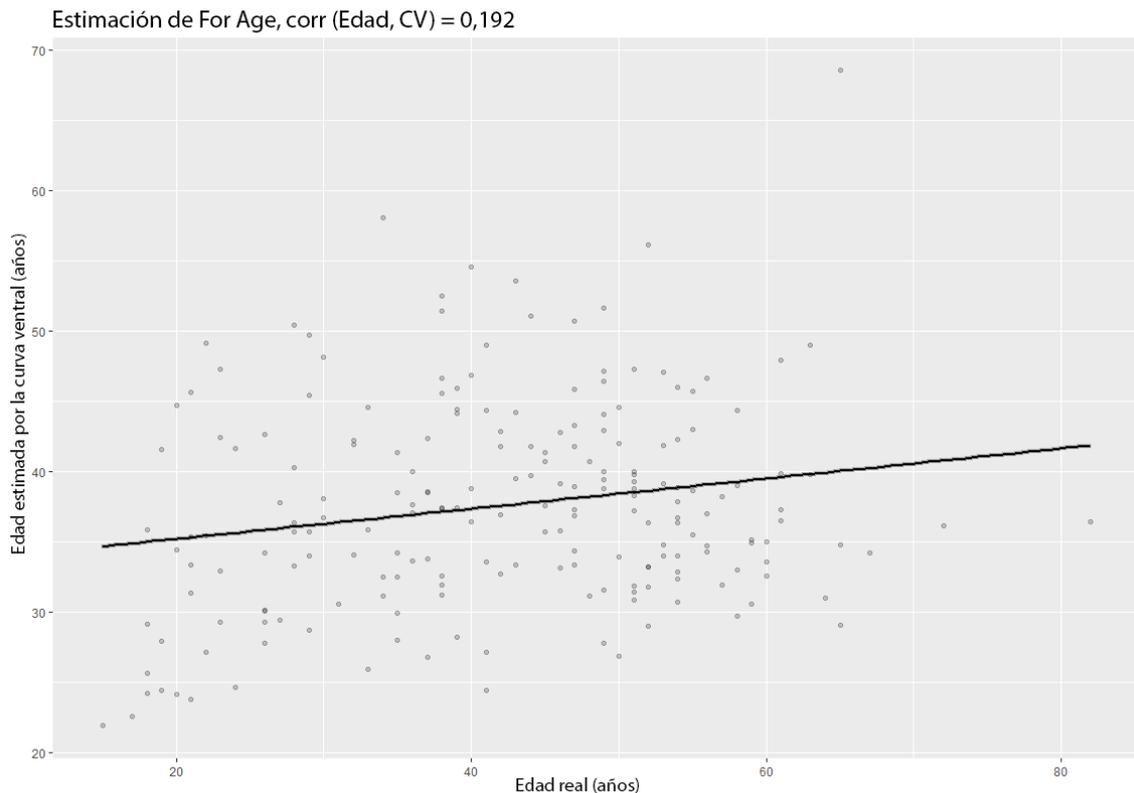


Figura 20. Regresión lineal de la edad real de los individuos de la muestra contra la edad estimada por el parámetro de la curva ventral (CV) de For Age. Podemos ver una gran dispersión de los puntos que crece con la edad, haciendo la estimación menos precisa a edades avanzadas.

Dado que ya se ha discutido que la sínfisis del pubis podría no ser un indicador de la edad útil a partir de los 50 años, acotamos la muestra a aquellos individuos más jóvenes que 50 años y repetimos los análisis. Esta vez obtuvimos correlaciones de 0,476 para SAH (Figura 21), 0,464 para la energía de torsión (Figura 22) y 0,336 para la curva ventral (Figura 23). La raíz del error cuadrático medio fue de 11 años para SAH, 12 años para la energía de torsión y 10 años para la curva ventral.

Estimación de For Age, corr (Edad<50, SAH) = 0,476

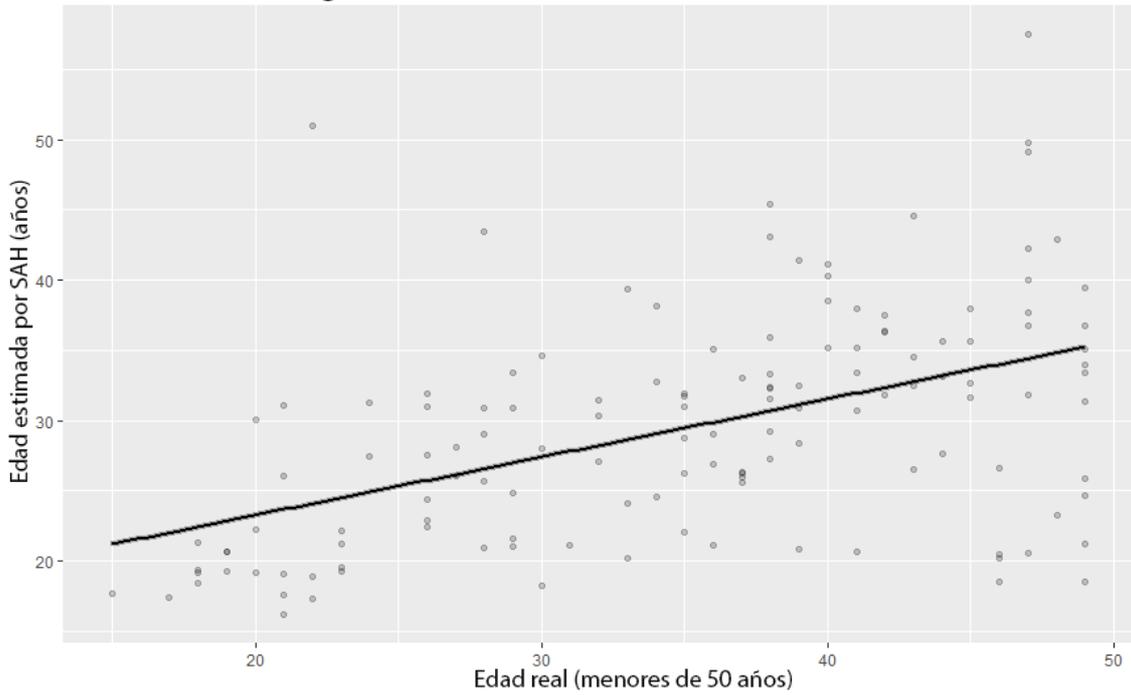


Figura 21. Regresión lineal de la edad real de los individuos menores de 50 años contra la edad estimada por el parámetro SAH de For Age. Si bien la dispersión de los puntos crece al acercarnos a los 50 años, el ajuste de los puntos a la regresión lineal es mejor que con todo el rango de edad.

Estimación de For Age, corr (Edad<50, ET) = 0,464

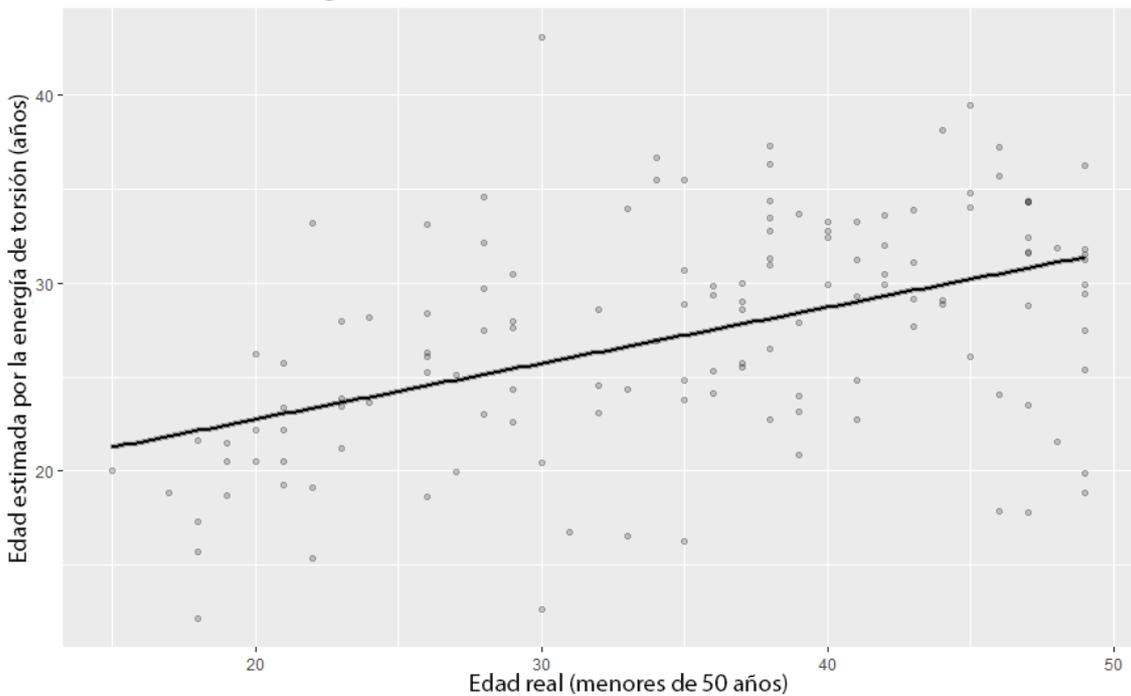


Figura 22. Regresión lineal de la edad real de los individuos menores de 50 años contra la edad estimada por el parámetro de la energía de torsión (ET) de For Age. Encontramos gran dispersión de los puntos excepto en los individuos más jóvenes.

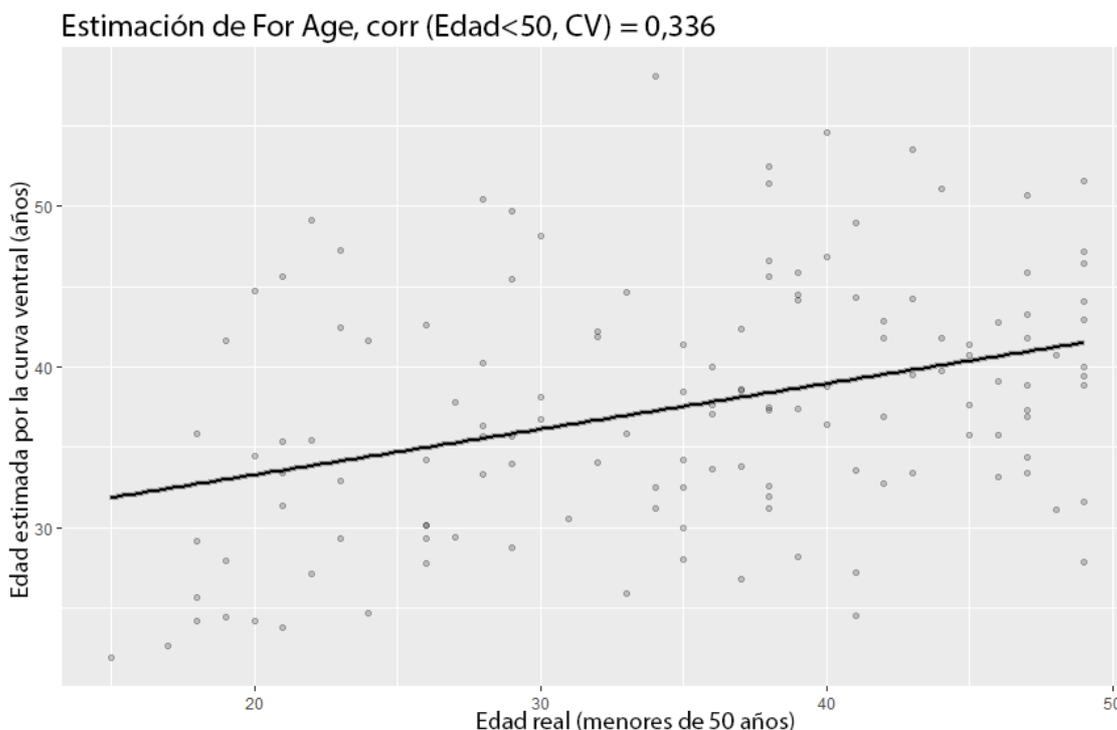


Figura 23. Regresión lineal de la edad real de los individuos menores de 50 años contra la edad estimada por el parámetro de la curva ventral (CV) de For Age. Encontramos gran dispersión de los puntos excepto en los individuos más jóvenes.

En la Figura 24 podemos visualizar cómo se comportan estos indicadores respecto a la edad real. Las estimaciones de For Age (el círculo rojo representa la media de la edad real en, 35,2 años) son 5,5 años más jóvenes para SAH, cerca de 8 más jóvenes para la energía de torsión y 2,5 años más viejos para el CV. La correlación más alta para la edad es con la puntuación SAH.

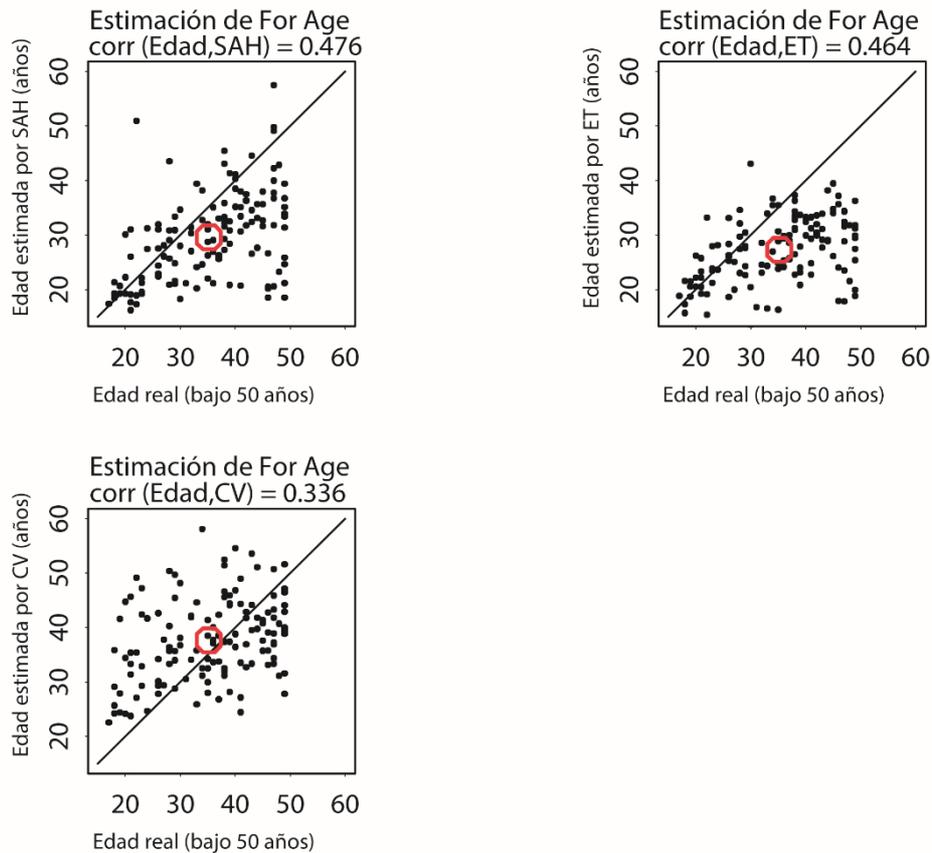


Figura 24. Edad estimada por For Age contra la edad real de la muestra restringida a individuos únicamente menores de 50 años. Las estimaciones promedio de For Age (marcadas por el círculo rojo sobre la edad media real, 35,2 años) son de 5,5 años por debajo para SAH, casi 8 años por debajo para la energía de torsión y 2,5 años por encima para la curva ventral. La correlación más alta con la edad real es para la estimación del SAH.

5.3 DISCUSIÓN: FOR AGE

El paquete de software For Age ha demostrado ser competente en variedad de escenarios (Kim et al., 2019; Kotěrová et al., 2019; Soto et al., 2018) y es una herramienta en uso para la estimación de la edad al morir basada en la sínfisis del pubis. Cuando lo aplicamos en nuestra muestra podemos ver correlaciones de la edad estimada con la edad real muy parecidas a las de las publicaciones originales (Kotěrová et al., 2019; Soto et al., 2018; D. Stoyanova et al., 2015; D. K. Stoyanova et al., 2017). Podemos ver en la Figura 24 todas las

puntuaciones que el software For Age ha reportado contra la edad real de los individuos de la muestra: SAH, energía de torsión y CV. El panel con la puntuación del SAH cuenta con el mayor valor de correlación, 0,476, pero parece ignorar las agrupaciones reales de la nube de puntos. Las líneas de regresión mostradas en las gráficas pertenecen a la regresión del efecto (morfometría) sobre la causa, no a la regresión inversa que es el objetivo real de este ejercicio. Para una estimación perfecta, todos los puntos deberían de encontrarse sobre esta línea.

Al utilizar For Age durante todo el rango de edad, el error de las estimaciones es mayor, es por ello que todos los análisis a continuación van a ser acotados hasta los 50 años, debido a las recomendaciones de la bibliografía (Meindl et al., 1985; Todd, 1920) y a estos resultados obtenidos aquí.

El hecho de que este método de estimación ha sido validado con otras muestras con buenos resultados aporta solidez (Kim et al., 2019; Kotěrová et al., 2019; Soto et al., 2018) y pone una marca a superar para nuestro método en desarrollo.

Capítulo 6

La morfometría geométrica

6.1 INTRODUCCIÓN A LA MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA

El estudio de la morfometría trata del análisis cuantitativo de la *forma* (Slice, 2007). En morfometría geométrica, se cuantifica la *forma* de una estructura (en este caso, anatómica) por medio de sus características geométricas. La *forma* es “capturada” gracias al uso de coordenadas de puntos discretos en un espacio bi- o tridimensional (F. Bookstein, 1991). En los estudios de morfometría geométrica, la forma de un objeto se compone del tamaño y de la *forma* (en inglés, shape) (Toro Ibacache, Manriquez Soto, & Suazo Galdames, 2010). El problema derivado de la traducción de términos entre el inglés y el español se tratará más adelante.

Fred Bookstein, en su publicación de 1986 (F. L. Bookstein, 1986), anunció “el amanecer de una nueva era para el estudio de la *forma* y el crecimiento”. Estas publicaciones junto su artículo de 1989 y el libro de 1991 (F. Bookstein, 1991; F. L. Bookstein, 1989) “yacen en el centro del desarrollo moderno de la morfometría geométrica” (Reyment, 2010). Esta sería definida como el conjunto de métodos que hacen posible la descripción cuantitativa, análisis e interpretación de la *forma* y de su variación y covariación con otros parámetros.

Muchos laboratorios han adaptado sus propios protocolos (D. C. Adams, Rohlf, & Slice, 2013; Bastir et al., 2019) dependiendo de los análisis que realizan normalmente, generalmente, el procedimiento una vez la muestra está digitalizada es el siguiente (Slice, 2005, 2007; Zelditch, Swiderski, & Sheets, 2012):

1. Establecimiento de landmarks de coordenadas (en 2 ó 3 dimensiones) que definan las posiciones relativas de localizaciones anatómicas. Estos representan puntos discretos de la anatomía y, entre todos, corresponden a la forma de la muestra.
2. Con el conjunto de landmarks de cada individuo como coordenadas X, Y, Z, el primer paso es la superposición de Procrustes (Goodall, 1991; Gower, 1975), en la cual los especímenes son trasladados a un origen

común, escalados a un tamaño del centroide común, se superponen estos centroides y se rotan con el objetivo de minimizar el total de la suma de los cuadrados de las desviaciones de cada individuo respecto a una configuración intermedia (Gower, 1975).

3. Tras completar el paso anterior, hay distintos análisis dependiendo de qué busquemos conocer. Frecuentemente se empieza con el análisis de componentes principales (PCA), que ayuda a explorar (y visualizar) los patrones de variación de la muestra (Houle, Mezey, & Galpern, 2002) o una variación de este, el análisis de componentes principales en el espacio de la forma de Procrustes, utilizado para analizar trayectorias alométricas. Otro análisis útil es la comparación de las medias, para comprobar las diferencias en la *forma* entre grupos (bien a partir de los componentes principales obtenidos previamente o directamente de las coordenadas de la *forma*). También podemos comparar la *forma* con un factor de carácter continuo (en este caso, la edad) mediante una regresión multivariable. Por último, los patrones de covariación entre dos *formas* diferentes se estudian mediante el análisis de mínimos cuadrados parciales entre dos bloques (Two Blocks Partial Least Squares analysis o 2B-PLS), que encuentra combinaciones lineales en cada bloque maximizando la covariación entre estos (Rohlf & Corti, 2000).

4. Una de las mayores ventajas de la morfometría geométrica es la visualización, por medio de gráficos, de la variabilidad de la *forma*. El análisis de componentes principales (PCA) puede representar la dispersión de *formas* en el espacio tangente (Figura 25). En un esfuerzo por capturar mejor la información sobre la *forma* media, las rejillas de transformación de “thin plate spline” permiten visualizar las variaciones en la *forma* de manera gradual y transformar (warping) un objeto en otro (F. L. Bookstein & Green, 1993).

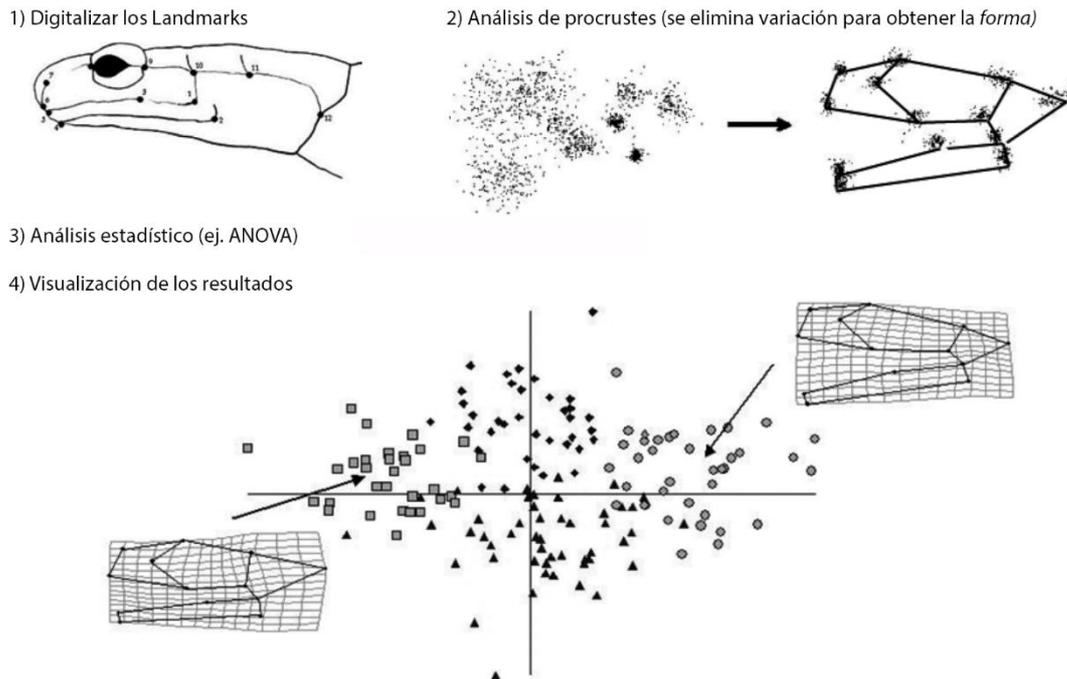


Figura 25. Esquema que resume los pasos seguidos más frecuentemente en los análisis de morfometría geométrica (modificado de D. C. Adams et al., 2013)

Aun omitiendo toda la parte matemática y resumiendo mucho el procedimiento más común, es confuso. Para el estudio de la morfometría geométrica en mayor profundidad, es recomendable leer Bookstein 2018 (F. L. Bookstein, 2018) o Dryden y Mardia (I. L. Dryden & Mardia, 2016).

A continuación, se aclararán y explicarán algunos de los términos utilizados anteriormente para facilitar la comprensión del trabajo desarrollado siguiendo estos pasos.

6.2 EL CONCEPTO DE *FORMA*

En primer lugar, hay que especificar qué estamos diciendo cuando hablamos de “forma” en el contexto morfométrico: La forma de un objeto (en inglés “form”) está compuesta por el tamaño (en inglés “size”) y la forma (en inglés “shape”). Este problema de origen lingüístico puede llevar a confusión, durante esta explicación, “shape” será referida como *forma* en cursiva. El

concepto de *forma* (“shape”) corresponde a toda la información geométrica restante tras eliminar los efectos de traslación, rotación y escala (Toro Ibacache et al., 2010) y es más fácil de entender gráficamente (Figura 26). Esta información proviene del conjunto de puntos de referencia, o landmarks, coincidentes en cada individuo de la muestra. Los individuos serán estudiados a través de las configuraciones completas de landmarks. Los efectos previamente mencionados que tienen que ser eliminados de todos los sets de landmarks son, por orden de ocurrencia: la escala, la traslación y la rotación (Goodall, 1991; Gower, 1975).

La escala: el estimador del tamaño más frecuente en morfometría geométrica es el tamaño del centroide (“centroid size”), que es igual a la raíz cuadrada de la suma de las distancias entre los landmarks y el centroide de la configuración al cuadrado.

Debido a la forma en que obtenemos el valor del tamaño del centroide, es sencillo escalar todas las configuraciones de landmarks de la muestra a un tamaño común, generalmente 1, aunque puede ser a menos de 1 para minimizar la distancia entre landmarks homólogos aún más. Esto elimina toda la información relativa al tamaño de los individuos, aunque para muchos análisis, puede ser reintroducida posteriormente.

La traslación: Se realiza desplazando los centroides de todos los individuos a un punto en común en el mismo eje de coordenadas.

La rotación: durante este proceso, se selecciona una configuración como referencia y se rotan las matrices de las configuraciones restantes hasta que todas las configuraciones se encuentran lo más cerca posible entre ellas, esto es, se minimiza la suma de las distancias al cuadrado entre landmarks homólogos (Figura 26).

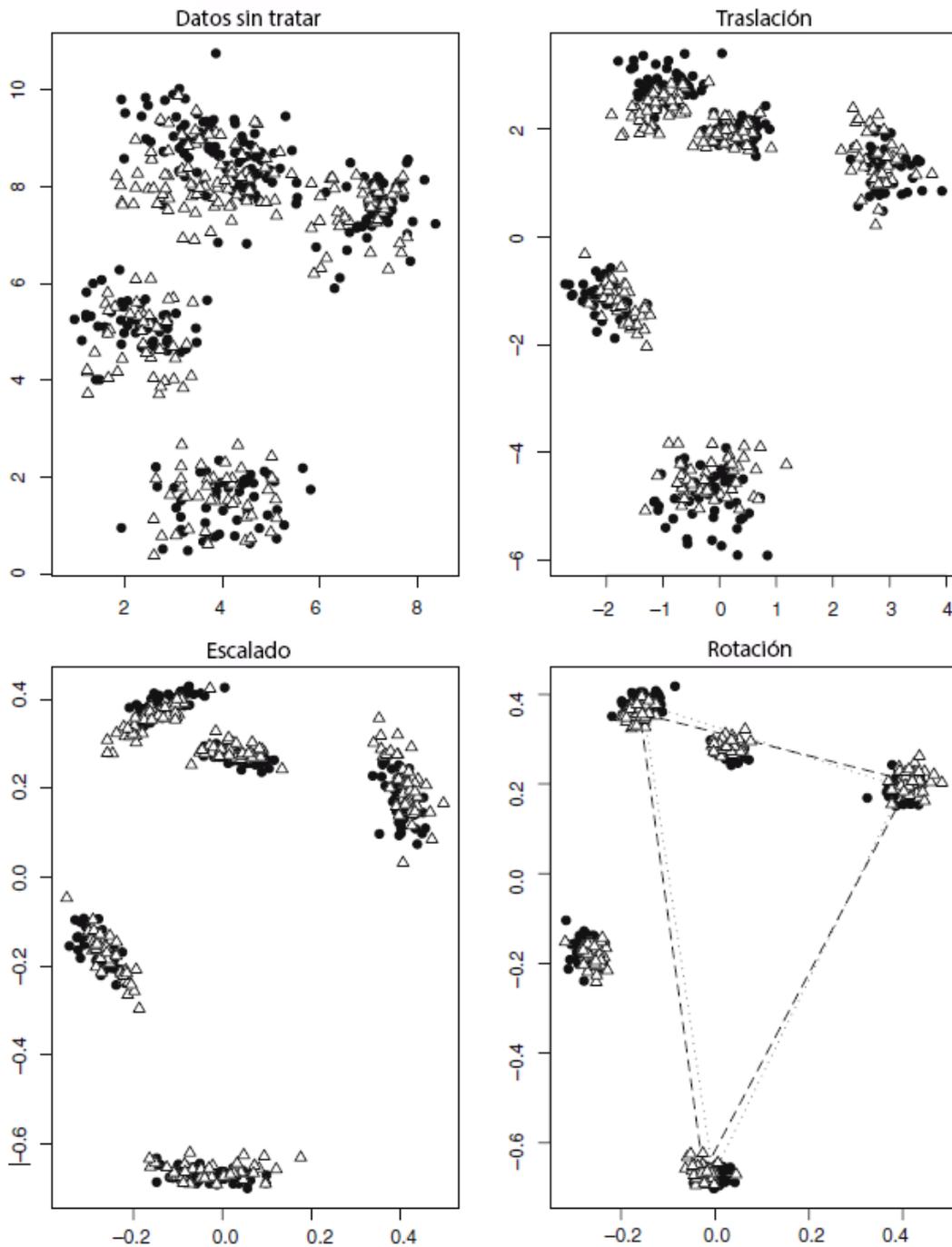


Figura 26. Representación de los tres pasos a seguir en el análisis de Procrustes, empieza en el primer panel con los datos extraídos de los landmarks sin tratar, después se traslada el centroide de cada configuración al 0,0 en el eje de coordenadas. Se escalan todos los centroides al mismo tamaño y se rotan las configuraciones minimizando la suma de las distancias entre landmarks homólogos al cuadrado. Modificado de Slice, 2006.

La información geométrica restante una vez eliminamos estos tres efectos es lo que llamamos *forma* (“shape”). Y las coordenadas resultantes (estas transformaciones alteran las coordenadas originales de cada landmark) se llaman coordenadas de *forma* de Procrustes (D. C. Adams, Rohlf, & Slice, 2004; F. Bookstein, 1991; I. Dryden & Mardia, 1998).

6.3 LANDMARKS Y SEMILANDMARKS

En segundo lugar, hay que describir lo que entendemos por punto de referencia o landmark. Estos son puntos anatómicos de referencia basados en coordenadas cartesianas (X, Y y Z en 3D). Estos corresponden a estructuras biológicas que deben de ser homólogas y repetibles entre todos los especímenes de la muestra a estudiar (F. Bookstein, 1991). Como puede imaginarse, la selección de los landmarks es un paso crucial en la morfometría geométrica. Los landmarks tienen que reunir los siguientes requisitos con el objetivo de estudiar formas biológicas:

Homología: aquellas estructuras que pueden ser consideradas homólogas deben de ser reconocibles en todos los individuos de la muestra a estudiar. También tienen que ser discretos, es decir, claramente diferenciables del resto de estructuras biológicas a su alrededor. Solo con landmarks homólogos podemos obtener una interpretación de la variación de la forma con significancia biológica. En los casos en que asegurar la homología de los landmarks no es posible pero la estructura es relevante, podemos recurrir al uso de semilandmarks.

Consistencia en su posición relativa: el orden de los landmarks y su localización debe de ser consistente a lo largo de toda la muestra.

Cobertura adecuada de la zona a estudiar: los landmarks deben de representar rigurosamente la estructura biológica que se va a analizar. Esto refiere también al número de landmarks a utilizar, dado que, si no son suficientes o son demasiados, estaremos distorsionando los resultados. Esto es especialmente así cuando el tamaño de la muestra es pequeño.

Repetibilidad: la localización de los landmarks debe de poder ser realizada sin error por ti como por otro investigador. Por ello, es importante detallar la información sobre los landmarks y su posicionamiento tanto como sea posible.

A su vez, se han descrito seis tipos de landmarks, previamente eran tres, pero Bookstein y Weber lo actualizaron en 2011 (G. W. Weber & Bookstein, 2011). El motivo por el cual hay diferentes tipos es debido a cómo los landmarks delimitan la explicación que podemos dar a un proceso biológico. Principalmente por la asunción de homología, particularmente problemática cuando examinamos una estructura como la sínfisis del pubis, que se deforma con la edad y hay estructuras que surgen y otras que desaparecen, todas con implicaciones funcionales. Para cubrir distintas estructuras con diferentes características, podemos recurrir a cualquiera de estos tipos de landmarks:

Tipo 1: Yuxtaposiciones discretas de tejidos, incluyendo puntos donde tres estructuras hacen una intersección como en la unión de suturas óseas (Nasion), intersecciones de curvas y puntos de origen de ramificaciones.

Tipo 2: Extremos de curvaturas u otros procesos de morfogénesis locales. Estos incluyen puntas o extrusiones y valles e invaginaciones.

Tipo 3: Puntos definidos localmente por múltiples curvas y por simetría.

3a. Intersección de una cresta y la curva media en la misma superficie (foramen magnum)

3b. Intersección de una curva y la curva media (borde posterior del paladar)

3c. Intersección de una cresta y otra curva observada en la misma superficie (sutura cruzando una cresta).

Tipo 4: Semilandmarks en curvas. Controlados (deslizados) por un término energético como la energía de torsión.

Tipo 5: Semilandmarks en superficies. Constreñidos a deslizarse respecto a la combinación de landmarks y semilandmarks de curva.

Tipo 6: Semilandmarks contruidos: varias localizaciones no cubiertas previamente. Proyecciones de una estructura en otra, principios y finales de curvas, lugares donde las curvas se acercan más, etc.

La implementación de estos semilandmarks hace posible el estudio de muchas estructuras que no podrían ser estudiadas de otro modo, como curvas o superficies. Sin embargo, hay que ser cuidadoso: los semilandmarks no son puntos discretos y su posición no pueden asignarse directamente, tampoco pueden ser analizados del mismo modo que los landmarks dado que poseen menor cantidad de información (Gunz & Mitteroecker, 2013; Gunz, Mitteroecker, & Bookstein, 2005).

Para realizar el análisis de los semilandmarks, primero es necesario llevar a cabo un proceso de superposición conocido como deslizamiento (en inglés, "sliding"). Los semilandmarks serán deslizados a lo largo de la curva o superficie a estudiar, cumpliendo con un sistema de optimización, generalmente se buscará la mínima energía de torsión necesaria para transformar la forma del individuo consenso en la forma del individuo a estudiar (Gunz & Mitteroecker, 2013; Gunz et al., 2005). Durante este proceso, la forma es considerada un todo. Todos los semilandmarks influenciados por los landmarks anatómicos se deslizan juntos.

Otro criterio para el deslizamiento es minimizar la distancia de Procrustes, de este modo, cada semilandmark se desliza por separado y este deslizamiento no se ve influenciado por los otros landmarks y semilandmarks. En casos en los que la variación entre individuos se estima que será grande, se recurrirá al criterio de minimizar la energía de torsión, dado que da mejores resultados y corresponde en mayor medida con la homología biológica.

6.4 EL ANÁLISIS

Dado que en morfometría geométrica trabajamos con gran cantidad de coordenadas, la dimensionalidad de los datos suele ser difícil de visualizar e interpretar. Por ello contamos con procedimientos que nos permiten resumir

estos datos y cuantificar la variación de la forma. Los conocidos como métodos de ordenación producen un nuevo conjunto de variables a partir de las combinaciones lineales de variables originales. También permiten la exploración visual de los patrones de cambio en la muestra. El nombre de ordenación proviene del hecho de que estos métodos ordenan a los individuos dependiendo de los valores obtenidos en estas nuevas variables (Zelditch et al., 2012).

Análisis de componentes principales (PCA). Este análisis tiene como objetivo el de simplificar los patrones de variación de la *forma*, facilitando así su interpretación. Esto es llevado a cabo reemplazando las variables originales por la combinación lineal de las variables originales que sean independientes entre sí, estos son los componentes principales. Estos componentes principales serán ordenados acorde con la cantidad de varianza que expliquen. El resultado de este análisis será un gráfico bidimensional o tridimensional donde los individuos a estudio se reparten a lo largo de los ejes (que son los componentes principales), el primer eje será el que explique la mayor cantidad de varianza de la muestra y el segundo será ortogonal a este (independiente, estadísticamente hablando) con la segunda mayor cantidad de varianza explicada (Slice, 2007; Zelditch et al., 2012). El análisis de componentes principales no es recomendable para probar una hipótesis (F. L. Bookstein, 2017), esto es debido a la propia naturaleza matemática del análisis, cuyo objetivo es el de reducir el número de variables (al agruparlas linealmente) tanto como sea posible. Una señal biológica específica puede ser muy débil o sutil para ser mostrada en uno de los componentes principales y se perdería.

Una variación de este análisis es el PCA del espacio de la forma de Procrustes, con este, se ponen en relación el tamaño y la forma de la muestra introduciendo (además de las coordenadas de Procrustes) el logaritmo del tamaño del centroide (Log CS) originando una matriz compuesta por las coordenadas correspondientes a la forma y al Log CS (Bastir, Rosas, & O'Higgins, 2006; Klingenberg, 2016). Dado que los valores para el logaritmo de los tamaños de los centroides tienen, generalmente, la mayor varianza de la matriz y el primer componente principal (PC 1) de la distribución tamaño-forma suele estar alineado con el tamaño, este método es muy conveniente para comparar la variación de la forma del pubis según el sexo (por diferencias en el

tamaño relativo) pero, probablemente, no para la edad (Mitteroecker, Gunz, Bernhard, Schaefer, & Bookstein, 2004).

Dentro de las técnicas de estadística multivariable tenemos varios procedimientos que dependerán del análisis que pretendas realizar. Así, para la varianza el más común es el test F-Goodall (Goodall, 1991). Este compara las distancias de Procrustes entre los valores medios de los grupos a partir de la variación de cada uno. Este test expone el grado de separación entre grupos, pero no toma en cuenta la naturaleza de la distribución de los individuos, asumiendo que los distintos grupos tienen covarianzas similares. Esto puede llevar a suposiciones erróneas cuando (y ya podemos empezar a vislumbrar el problema) el tamaño de la muestra no es mucho mayor que el de variables (Klingenberg & Monteiro, 2005). Este test se combina con test de permutación para obtener la estimación del error (Bastir et al., 2019).

Mediante una regresión, se puede comparar la relación entre la *forma* y una (o varias) variable continua, como puede ser la edad (Slice, 2007) o discontinua, como grupos de edad o fases. Otro uso común de este tipo de análisis es el estudio de la alometría, para lo cual se reintroduce el tamaño de centroide (Mitteroecker, Gunz, Windhager, & Schaefer, 2013). Así, una regresión lineal puede detectar los efectos que estas variables continuas tienen sobre la *forma*. Mediante los modelos de regresión lineal podemos intentar predecir el efecto de una variable sobre la otra, en este caso, podemos estimar la influencia del sexo o la edad con el tamaño del pubis (tamaño del centroide) o la *forma* del pubis y estudiar el nivel de correlación entre estas variables.

Por último, un tipo de análisis que si puede utilizarse para testear hipótesis sería la ANOVA. La Procrustes ANOVA sirve para comprobar si existen diferencias en la *forma* entre las medias de dos grupos como pueden ser por sexo o rangos de edad. Este test requiera que la muestra tenga una distribución normal y homocedasticidad, generalmente son los test de Kolmogorov-Smirnov y test de Levene (Sokal & Rohlf, 1998) los utilizados para comprobar si los datos cumplen con estos requisitos.

Si bien este resumen de la morfometría geométrica es breve y simplifica enormemente su procedimiento (además de omitir la mayor parte de la

justificación matemática), es suficiente para entender y justificar el siguiente estudio que se realizó a fin de estimar la edad al morir a partir de la cara articular del pubis.

6.5 EL SOFTWARE

Los procedimientos descritos anteriormente pueden ser automatizados. Desde la recogida de landmarks hasta la visualización de resultados, todo el “toolkit” de la morfometría geométrica está asistido por paquetes de software que hacen todo el proceso infinitamente más sencillo. Este software es un gran aliado, pero también puede ser peligroso. Ya hemos visto que factores como el número de variables vs el tamaño de la muestra son cruciales para unos resultados fiables y una visualización coherente con la realidad. Para utilizar estos paquetes de software es necesario conocer en profundidad los análisis que estás haciendo. Por ejemplo, hay diversos programas que ayudan con la asignación de landmarks y el deslizado de semilandmarks, sin embargo, los landmarks que asignes deben de cumplir los requisitos de homología, consistencia, cobertura y repetibilidad (también coplanaridad, pero en el caso de muestras en 2D). Ya se ha enfatizado la importancia de este paso, un paquete de software registra coordenadas, pero no “sabe” si el landmark que estás marcando es válido.

Lo mismo ocurre con los análisis y la visualización. De nada vale un test posterior de validación cruzada si la muestra no cumple con las características necesarias para realizar el análisis. Puedes acabar con artefactos estadísticos significativos que no valen nada. Hay que ser cuidadoso en su utilización y conocer las limitaciones de las herramientas que estamos utilizando (Bastir et al., 2019).

Para la toma de coordenadas, análisis y visualización en muestras en 2D, la colección TPS suite (Rohlf, 2015) (<http://life.bio.sunysb.edu/morph/>) permite hacer todo lo que puedas necesitar. Es completo, multiplataforma, gratuito y puedes encontrar guías y asistencia fácilmente.

Para trabajar con muestras en 3D, como es en este caso, es más complicado. Un paquete que puede hacer la gran mayoría de procesos desde la recogida de landmarks hasta la visualización es EVAN toolkit (Phillips et al., 2010) (<https://www.evan-society.org/>). Si bien no es gratuito, comparte el resto de las características con TPS *suite*.

Para este estudio, ya se clarificó que el objetivo era hacerlo gratuito para mejorar su posible implementación. Tras probar diferentes paquetes, paso a comentar los siguientes:

Para el proceso de recogida de landmarks y deslizamiento de semilandmarks, Viewbox4 (Halazonetis, 2014). Viewbox 4 no es gratis, pero puedes usar una licencia de prueba que tan solo añade tiempos de espera entre pasos, sin embargo, son cortos y ayudan a despejar la vista durante el proceso.

Este software (Figura 27) te permite crear una plantilla o “template”, en la cual debes de asignar los landmarks y semilandmarks a mano y después permite proyectar esta plantilla sobre cada individuo de la muestra y deslizar los semilandmarks de una manera rápida, sencilla y con menos posibilidad de error. Obviamente, requiere que la creación de la plantilla cuente sea un proceso metódico e inteligente, si la asignación de landmarks o el marcado de curvas o superficies no puede realizarse en toda la muestra, la plantilla no servirá de nada y tendrás que empezar desde 0. Es muy importante tener conocimiento de la muestra que estas utilizando y la región donde estás colocando los puntos de coordenadas. Una vez la plantilla es creada, puede exportarse y editarse (para, por ejemplo, estudiar la misma región con otro enfoque, añadir o eliminar landmarks, etc.). En el proceso de deslizamiento de semilandmarks, Viewbox 4 te permite elegir el método de optimización y muestra el valor de energía de torsión y distancia de Procrustes necesarios para transformar la plantilla en el individuo donde ha sido proyectada. Esta energía de torsión será aplicada en el capítulo 7 para la estimación de la edad al morir.

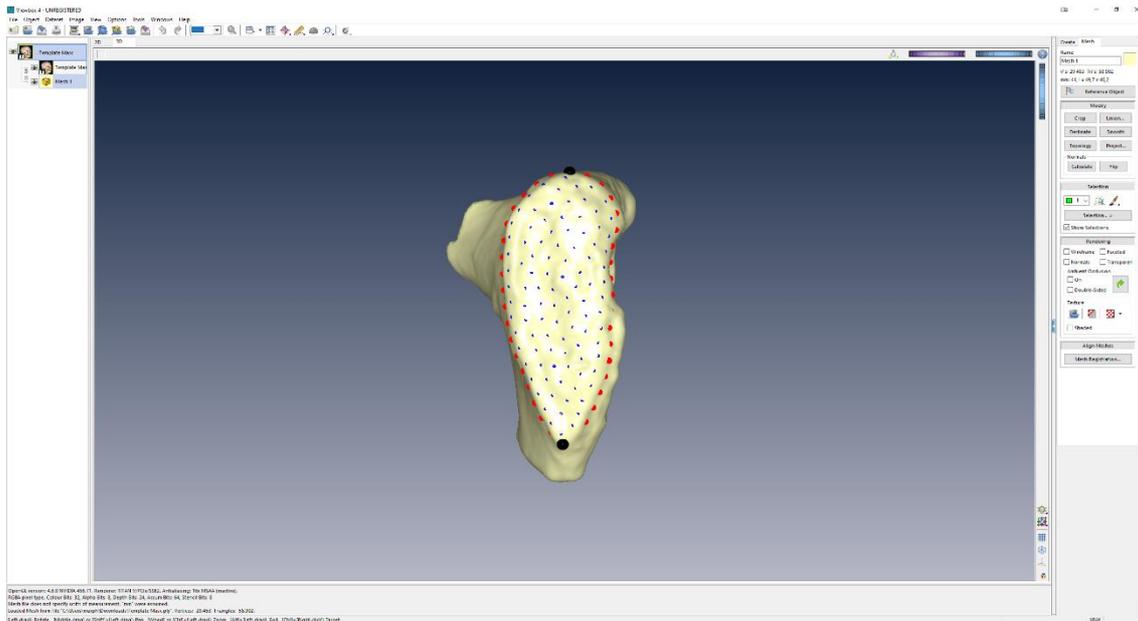


Figura 27. Ventana del software Viewbox 4 con la creación de la plantilla (template) para proyectar sobre el resto de la muestra.

El software elegido, para el análisis y visualización de los resultados fue Wolfram Mathematica 12 (Wolfram Research, s. f.), R con los paquetes geomorph (D. C. Adams, Collyer, Kaliontzopoulou, & Sherratt, 2016) y Morpho (Schlager, 2017) y MorphoJ (Klingenberg, 2011). Todos cumplen los requisitos especificados previamente y cuentan con los análisis descritos. Además, MorphoJ te avisa cuando la muestra que estás utilizando es demasiado pequeña y los resultados podrían ser un artefacto. Es software sencillo de utilizar y cuenta con una guía completa y bien explicada.

6.6 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA: LANDMARKS

Para el estudio de la sínfisis del pubis y para capturar la información relevante durante su metamorfosis a lo largo del tiempo, los landmarks no son una buena idea. La sínfisis del pubis cambia mucho a lo largo del tiempo, estructuras aparecen y desaparecen haciendo casi imposible crear una plantilla que capture todos estos cambios.

Ya hemos hablado de Viewbox 4 antes (Halazonetis, 2014). Es un software comercial (aunque se puede utilizar con licencia gratuita con muy pocas

restricciones) que incluye gran variedad de utilidades: desde manipulación de CTs, segmentación y algo de edición básica de mallas de puntos, pasando por lo más importante para este proyecto, posibilidad de hacer medidas en superficies, colocación de landmarks y deslizamiento de semilandmarks en curvas y superficies. Además, permite ejecutar los análisis más básicos de morfometría geométrica (superposición de Procrustes, análisis de componentes principales, visualización en “thin plate spline” y métodos de estimación de landmarks que faltan). Esta es la mejor opción para colocar los landmarks para este estudio.

For Age lo hace de una manera brillante: el software proyecta una rejilla de puntos sobre el pubis (Figura 28), todos aquellos con un valor en el eje Z diferente de 0 significa que está sobre la superficie del pubis. Aquellos puntos con $Z = 0$ son descartados (D. Stoyanova et al., 2015; D. K. Stoyanova et al., 2017). De esta manera tienes un set de landmarks cubriendo toda la superficie articular. Y aun con la brillantez y elegancia con la que este arduo proceso es realizado automáticamente, estos landmarks no serían válidos para el contexto de la morfometría geométrica; incluso alineando todos los pubis de igual manera y eliminando toda la parte del hueso que no sea la sínfisis (este es el motivo por el cual For Age tiene estos dos requerimientos), los landmarks producidos no son homólogos, consistentes ni repetibles. Hay otra limitación, para cubrir toda la superficie articular necesitas una mayoría de semilandmarks, para los bordes ventral y dorsal y para la superficie per se. Estos semilandmarks se deslizan utilizando como referencia los landmarks de tipo 1, 2 y 3 previamente colocados, necesitando por ello, tantos landmarks fijos como sea posible. El número de variables por cada individuo es irremediamente elevado y la colección de la que disponemos, si bien es de las más numerosas del mundo, puede llegar a ser el factor limitante para la aplicación de técnicas de morfometría geométrica.

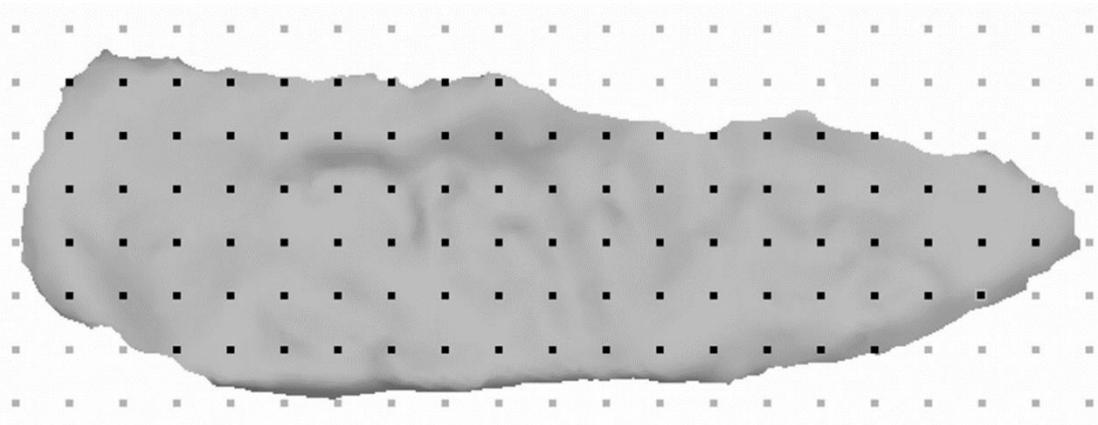


Figura 28. Proceso que For Age utiliza para marcar los landmarks en la superficie articular del pubis. Una vez el pubis está orientado con el borde ventral hacia arriba, se proyecta una rejilla de puntos con tres coordenadas x , y , z cada uno. Tras ello, aquellos puntos con $z = 0$ (que son aquellos que han caído fuera del pubis) son eliminados. Tomada de Stoyanova et al., 2015.

Durante el proceso exploratorio de ensayo y error, se probaron hasta 4 configuraciones distintas de landmarks y semilandmarks siendo tres de ellas defectuosas. A día de hoy, se han descrito tan solo dos landmarks fijos en la superficie articular del pubis:

Superior: el punto donde el margen superior de la superficie de la sínfisis forma un borde con la superficie superior del pubis.

Inferior: el punto al borde inferior de la sínfisis más cercano a la inserción de ligamento subpúbico.

Estos landmarks sirven de inicio y final de dos curvas de semilandmarks, una dorsal y la otra ventral y, a lo largo de la superficie entre estas dos curvas, se dispersó un parche de 100 semilandmarks para capturar toda la superficie y el proceso de obliteración de las crestas y valles, así como la aparición de porosidad. Sin embargo, Viewbox4 no permite deslizar semilandmarks con menos de 5 landmarks fijos, principalmente los de superficie serían imposibles de proyectar sin estos landmarks como referencia (hay que recordar que, a pesar de ser semilandmarks, deben de seguir cumpliendo ciertos requisitos).

La forma de solucionar este problema de una manera definitiva que no origine nuevos errores en la proyección de la plantilla es transformando los semilandmarks de las curvas en landmarks. Esto es posible cambiando el criterio

de optimización de los semilandmarks en las curvas. En lugar de utilizar la energía de torsión, se permite a los semilandmarks ubicarse en la curva patrón (que imita el borde dorsal o ventral) con distancias idénticas entre ellos (Figura 29). Esto implica que los nuevos landmarks siempre actuarán como un borde alrededor de la superficie articular donde los semilandmarks de superficie pueden deslizarse apropiadamente. Los landmarks que marcan ahora los bordes no pueden ser usados para el análisis de la *forma*. Son posiciones arbitrarias y su información no aporta nada biológicamente hablando, solo son un margen para los semilandmarks que aportarán la información valiosa. Dado que se eligieron 100 semilandmarks y la superficie del pubis no es extensa, los semilandmarks estarán lo suficientemente cerca unos de otros para capturar también la información de los bordes dorsal y ventral, así como lo que acontece en ellos durante la metamorfosis. Al final, cada pubis está descrito por dos landmarks fijos y 100 semilandmarks de superficie, sumando un total de 102.

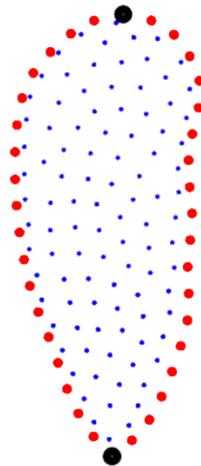


Figura 29. Plantilla creada para la cara articular del pubis. Está formada por dos landmarks fijos, uno en la zona superior y otro en la inferior de la sínfisis. Hay 18 semilandmarks en los bordes dorsal y ventral para ayudar a deslizar los 100 semilandmarks en la superficie del hueso. Estos semilandmarks en los bordes solo pueden utilizarse para un estudio morfométrico si se repite el proceso de deslizamiento previamente.

No es lo óptimo, pero no me ha sido posible encontrar otra manera de crear un set de coordenadas repetibles que se adapten a las más de 400 sínfisis de la colección. La plantilla tiene la ventaja de que, con su imagen especular en

el eje vertical, puedes analizar ambas hemicaras con el mismo set de landmarks eliminando posibles errores en el orden y posición de los landmarks entre los lados izquierdo y derecho, además de poder transformar todo un lado en su imagen especular, haciendo todas las caras articulares derechas o izquierdas si el análisis así lo requiriera.

Para un análisis exploratorio, empezar con 100 semilandmarks de superficie y dos landmarks fijos es como correr antes que andar. Dado que los bordes ventral y dorsal se han utilizado para la estimación de la edad al morir (VC de Forage), se creó una segunda plantilla formada por los dos landmarks fijos ya descritos y 18 semilandmarks a lo largo del borde dorsal y otros 18 a lo largo del ventral, 38 puntos de coordenadas en total.

6.7 INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO MORFOMÉTRICO

Estamos dando por asumido que la estimación de la edad al morir debe de realizarse por separado en hombres y mujeres (Brooks & Suchey, 1990; McKern & Stewart, 1957; Todd, 1920), sin embargo, es interesante probar si esto es así para nuestra muestra. La pelvis es dimórfica, como muestra la Figura 30 (Arsuaga & Carretero, 1994; Fischer & Mitteroecker, 2015, 2017; Kurki, 2011; Tague, 1992; Walrath & Glantz, 1996; White & Folkens, 2005), el hueso del pubis también ha sido estudiado en este sentido (Estévez, López-Lázaro, López-Morago, Alemán, & Botella, 2017; Lottering, Reynolds, MacGregor, Meredith, & Gregory, 2014; Mallard, Savell, & Auerbach, 2017) pero, ¿lo es la sínfisis?, ¿es este dimorfismo suficiente como para separar mujeres de hombres al estudiar la edad al morir? La morfometría geométrica es el aliado perfecto para responder a estas preguntas.

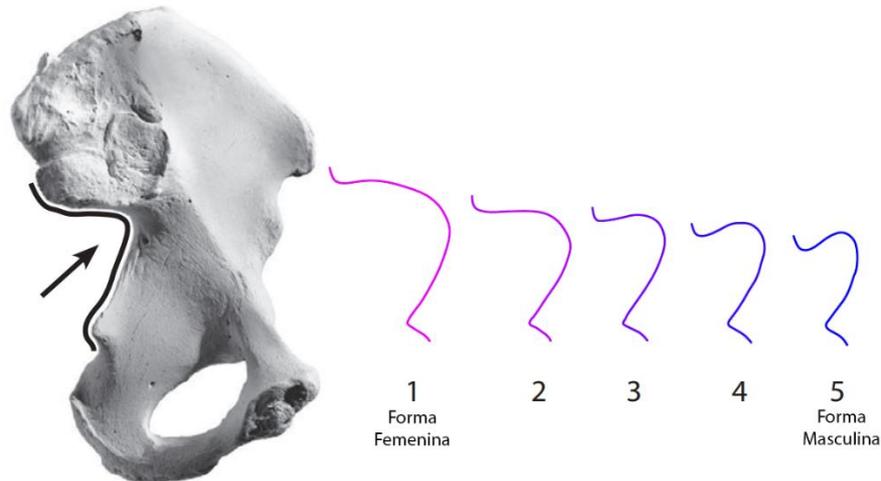


Figura 30. Una de las diferencias morfológicas que, en antropología física, puede utilizarse para estimar el sexo de la pelvis, la curvatura de la escotadura ciática. La pelvis es el hueso de elección para este cometido. Modificada de White & Folkens, 2005.

Los objetivos de este estudio morfométrico son: (1) explorar si la forma del contorno de la sínfisis púbica humana es sexualmente dimórfico, (2) evaluar si el dimorfismo sexual en la forma de la sínfisis varía con la edad y cómo lo hace y (3) identificar si el contorno de la sínfisis púbica podría ser utilizado para la estimación de la edad al morir.

6.8 MATERIAL Y MÉTODOS: MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA

Para este estudio se han usado la sínfisis púbica izquierda de 117 mujeres entre 14 y 69 años y 206 hombres entre 15 y 82 años. La digitalización de estos pubis, como se ha explicado anteriormente, fue realizada con el escáner de superficie Artec Spider (Artec Spider, Grupo Artec).

Las configuraciones de landmarks en 3D fueron proyectadas en un plano ajustado por mínimos cuadrados a los landmarks de cada individuo utilizando Wolfram Mathematica 12 (Wolfram Research, s. f.). Esto resultó en una configuración de 38 landmarks en 2D por individuo. Tras la proyección en 2D, los semilandmarks fueron deslizados de nuevo minimizando la energía de

torsión. Este re-deslizamiento fue realizado en R con los paquetes geomorph (D. C. Adams et al., 2016) y Morpho (Schlager, 2017).

Las variables biométricas utilizadas para este estudio morfométrico, junto a los landmarks, fueron sexo (hombre o mujer) y edad en años. Adicionalmente, dividimos la edad en cuatro grupos correspondientes a las diferentes fases de la metamorfosis de la sínfisis descritas por Meindl et al. (Meindl et al., 1985):

Grupo A: 14 a 29 años. Este grupo es el que Meindl describiría como “fase preepifisal” y es similar para ambos sexos. La superficie crestada de la sínfisis sufre la mayoría de los cambios.

Grupo B: 30 a 40 años. Este grupo está formado por la “fase de epífisis activa” y la “fase postepifisal inmediata”. Corresponden a la formación de la rampa ventral y su transición en textura del borde ventral de desigual y granular a densa o de grano fino.

Grupo C: 41 a 49 años. Corresponde a los últimos cambios predegenerativos y al periodo durmiente de la sínfisis. Los primeros cambios degenerativos que podemos encontrar en este grupo son en el margen dorsal.

Grupo D: 50 a 82 años. Los posibles cambios ocurridos en este grupo son caóticos y dependen de diversos factores independientes de la maduración de la sínfisis. Labiaciones y rotura de los bordes son los cambios más frecuentes que podemos encontrar a lo largo del borde de la sínfisis.

Para el análisis de la *forma* del contorno de la sínfisis púbica la variación debida a la posición, orientación y tamaño fueron eliminados de las coordenadas de los landmarks por Superposición de Procrustes (Gower, 1975). Las coordenadas de la *forma* resultantes fueron ordenadas por un análisis de componentes principales (PCA). Basados en los valores de los componentes principales, calculamos las medias de los grupos para los cuatro grupos de edad, separados por sexo. Después, calculamos las trayectorias ontogénicas para las medias de los grupos a lo largo de los primeros 4 componentes principales, separado para hombres y mujeres. Para examinar los efectos del sexo y el grupo

de edad en la *forma* del contorno de la sínfisis, realizamos un Procrustes ANOVA de las coordenadas de la *forma*.

Subsecuentemente, calculamos regresiones multivariantes en la *forma*, independientemente para hombres y mujeres, utilizando la edad como una variable continua en lugar de los grupos discretos utilizados previamente en las Procrustes ANOVA. Estas regresiones multivariantes producen vectores de coeficientes de regresión que describen cómo toda la *forma* del contorno de la sínfisis cambia conjuntamente en respuesta al cambio en una unidad (un año) en edad. Se testeó la significancia estadística de esta regresión utilizando un test de permutación (Good, 2013).

6.9 RESULTADOS DEL ESTUDIO MORFOMÉTRICO

Las distribuciones de edad para hombres y mujeres se superponen (hombres: edad media 42,05 años con desviación estándar de 13,14 años; mujeres: edad media de 41,95 años con desviación estándar de 14,33 años). Las distribuciones del tamaño de la sínfisis basadas en el tamaño del centroide (hombres: media del tamaño del centroide 87,54 con desviación estándar de 7,8; mujeres: media del tamaño del centroide 80,01 con desviación estándar de 7,22) y en longitud de la sínfisis calculada en milímetros entre el landmark superior e inferior (hombres: longitud media de 40,19 mm con desviación estándar de 3,8 mm; mujeres longitud media de 37,45 mm con desviación estándar de 3,43 mm) muestran que la sínfisis púbica de los hombres es de mayor tamaño que las de las mujeres. Desafortunadamente, debido a que la muestra no cuenta con la estatura o peso del individuo, no podemos decir si esta diferencia en tamaño es solo una consecuencia de que las mujeres son, en general, más pequeñas que los hombres.

Los cuatro primeros componentes principales conjuntamente explican el 77.4% de la variación total de la *forma* del contorno de la sínfisis (PC 1: 38,4%, PC 2: 22,1%, PC 3: 9,2% and PC 4: 7,8%) (Figura 31). Las diferencias dependientes del sexo fueron capturadas predominantemente por el PC 1.

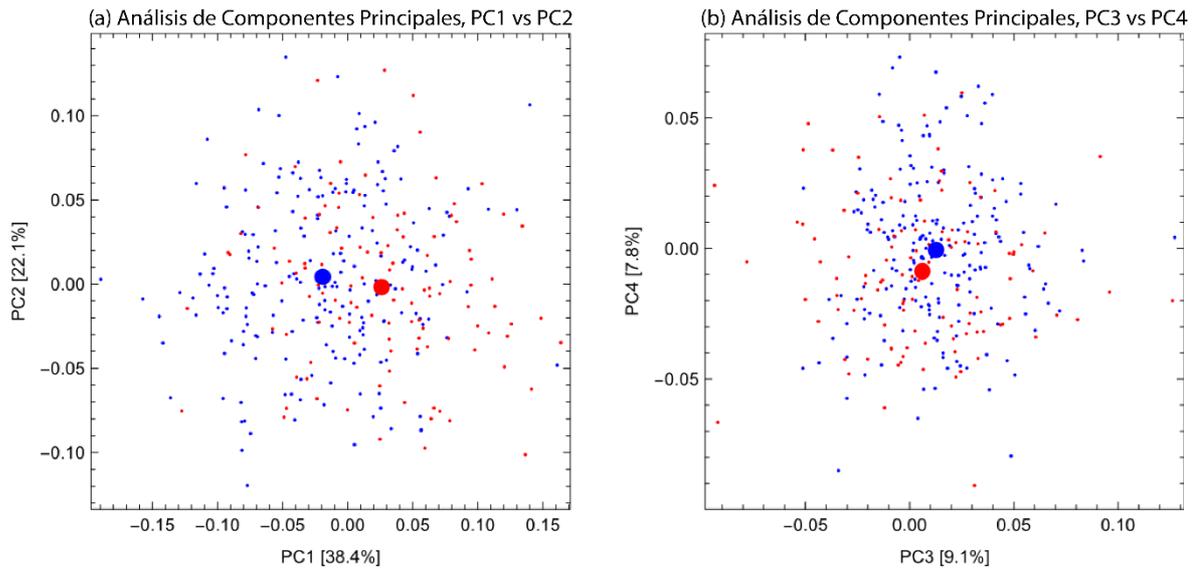


Figura 31. Análisis de Componentes Principales (PCA) de los datos de la *forma*. Las *formas* masculinas (azul) y femeninas (rojo) separadas a lo largo de los componentes principales PC 1 y PC 2 (a) o PC 3 y PC 4 (b). La *forma* media femenina y masculina están marcados como puntos más grandes de los mismos colores. La separación entre hombres y mujeres es capturada predominantemente por el PC 1.

Las trayectorias de las medias de los sexos a lo largo de los grupos de edad apoyan este descubrimiento e indican que la divergencia sexual en el PC 1 ocurre entre los grupos de edad A y B (Figura 32). PC 2 también contribuye a las diferencias basadas en el sexo, mientras que los cambios en la forma por la edad capturados por los PC 3 y PC 4 fueron similares para ambos sexos.

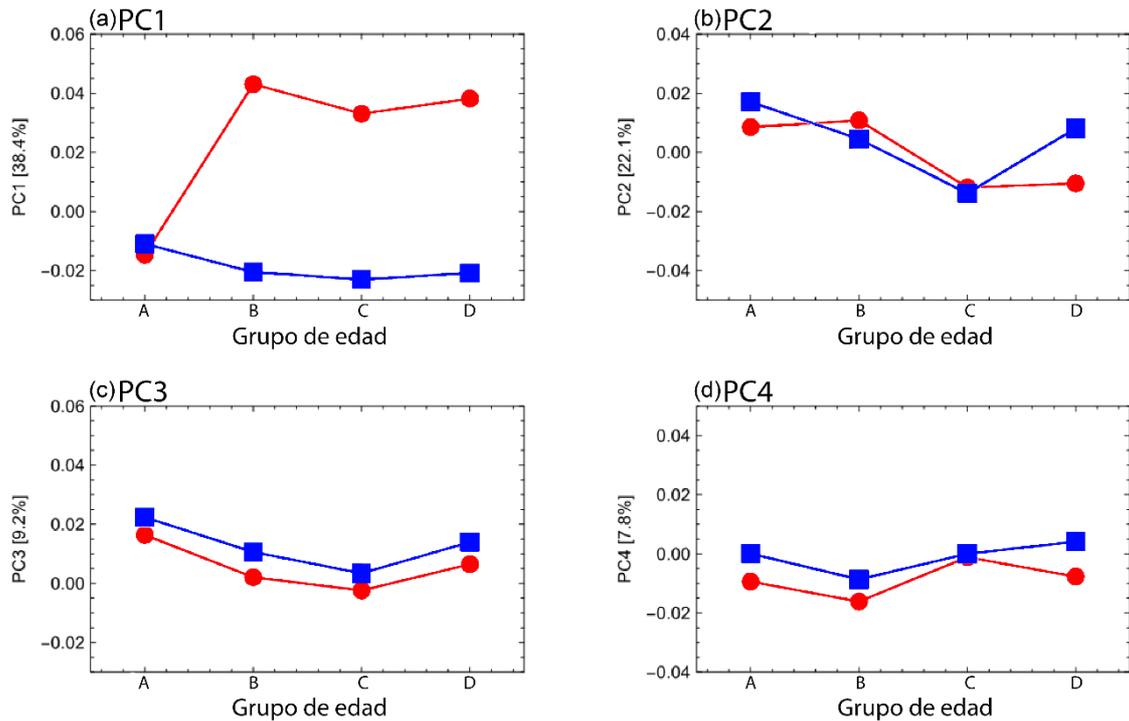


Figura 32. Puntuaciones de los componentes principales para la *forma* del contorno de la sínfisis en los grupos de edad A – D, para hombres (azul) y mujeres (rojo), el PC 1 (a), PC 2 (b), PC 3 (c) y PC 4 (d). Las diferencias a lo largo del PC 1 aparecen con el segundo grupo de edad (30 – 40 años). Los PC 3 y PC 4 capturan diferencias relacionadas con la edad similares para los dos sexos.

La visualización de los cambios en la *forma* del contorno de la sínfisis basados en rejillas de deformación (F. L. Bookstein, 1997) indicaron que el PC 1 corresponde a la anchura relativa de la sínfisis (Figura 33). El PC 2 describe un abultamiento en la parte craneal del margen ventral de la sínfisis, relativo a su anchura. El PC 3 corresponde a un abultamiento en el medio del margen ventral, relativo a la anchura de las partes craneal y caudal. El PC 4 describe la anchura relativa de la parte caudal de la sínfisis, comparado con la mitad craneal (Figura 33).

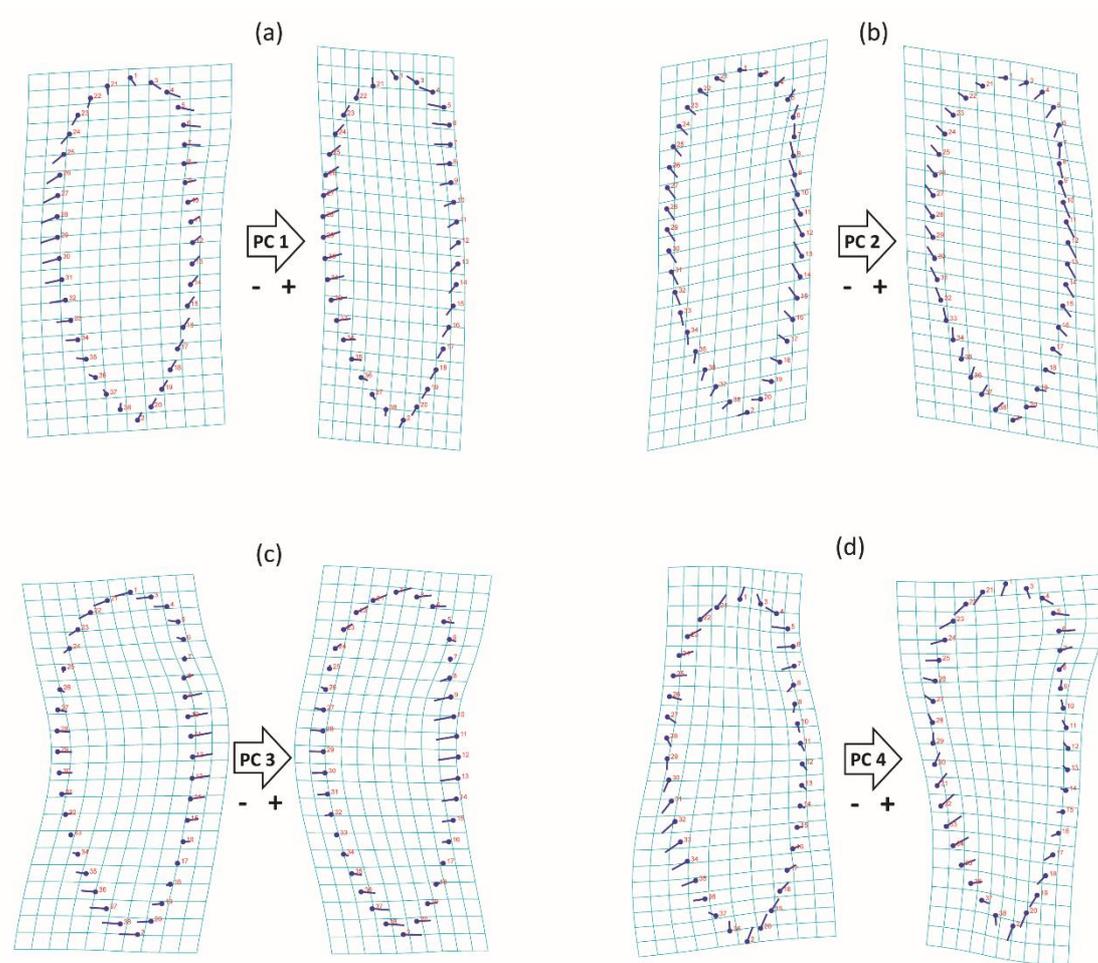


Figura 33. Cambios en la *forma* del contorno de la sínfisis correspondientes a los cuatro primeros PC; Las visualizaciones corresponden a 0,2 unidades de la distancia de Procrustes. El PC 1 describe el ancho relativo de la sínfisis. El PC 2 describe un abultamiento de la parte superior del margen ventral de la sínfisis. El PC 3 corresponde a una protuberancia en el medio del margen ventral de la sínfisis, en relación con el ancho de las partes craneal y caudal. El PC 4 captura el ancho relativo de la mitad inferior de la sínfisis, en comparación con la mitad superior.

Basados en la two-way Procrustes ANOVA, se identificaron diferencias significativas dependientes del sexo en la *forma* de la sínfisis ($F = 7.196$, $p = 0.014$), pero las diferencias de la *forma* entre los grupos de edad no fueron estadísticamente significativas ($F = 0.788$, $p = 0.49$), tampoco lo fueron las interacciones entre sexo y grupo de edad ($F = 1.767$, $p = 0.146$). Dado que estos resultados sugieren que la *forma* podría cambiar con la edad de manera más pronunciada en mujeres, también se testearon las diferencias entre los grupos

de edad en la muestra femenina exclusivamente, pero, de nuevo, no se encontraron diferencias significativas ($F = 1.767$, $p = 0.146$).

Sin embargo, utilizando la edad como una variable continua en una regresión con la *forma*, se identificaron asociaciones significativas entre la *forma* de la sínfisis y la edad para ambos, hombres y mujeres (test de permutación con 1000 permutaciones cada uno, $p < 0,001$ para mujeres y $p < 0,01$ para hombres). Basándonos en estas regresiones, la edad explica un 5% de la varianza total de la *forma* del contorno de la sínfisis en mujeres y solo un 0,7% en hombres. Además, se encontró mucha varianza individual en los patrones medios de edad en ambos sexos (Figura 34). La visualización de la *forma* del contorno de la sínfisis con respecto a la edad basada en estas regresiones indica que el contorno de la sínfisis, de media, se vuelve más estrecho y puntiagudo en el extremo posterior y más abultado en el margen ventral mientras que el margen dorsal se vuelve más irregular con el envejecimiento del individuo. Esto ocurre en ambos, hombres y mujeres, pero es más pronunciado en hombres (Figura 35).

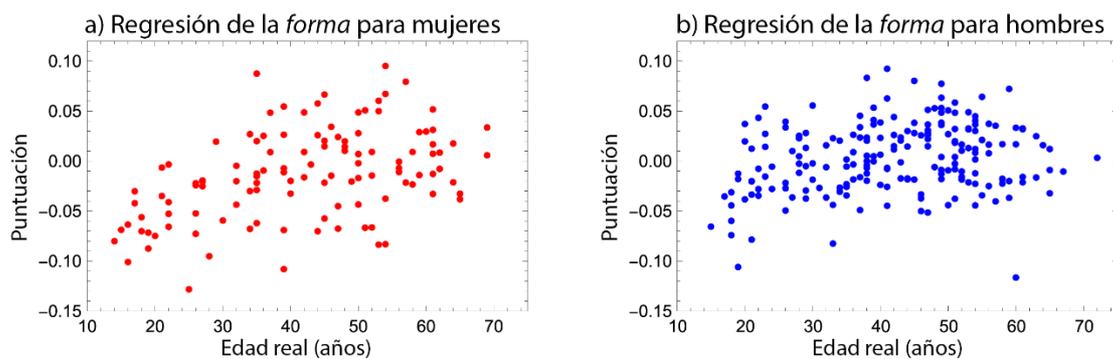


Figura 34. Puntuaciones de la regresión de la *forma*. Estos son los gráficos de dispersión de la edad real frente a las puntuaciones de la regresión de la *forma* del contorno de la sínfisis púbica, por separado en rojo para mujeres (a) y azul para hombres (b). Estas puntuaciones son proyecciones de la *forma* de sínfisis individuales en el vector de coeficientes de regresión correspondiente. Los diagramas de dispersión han sido calculados por separado para mujeres y hombres.

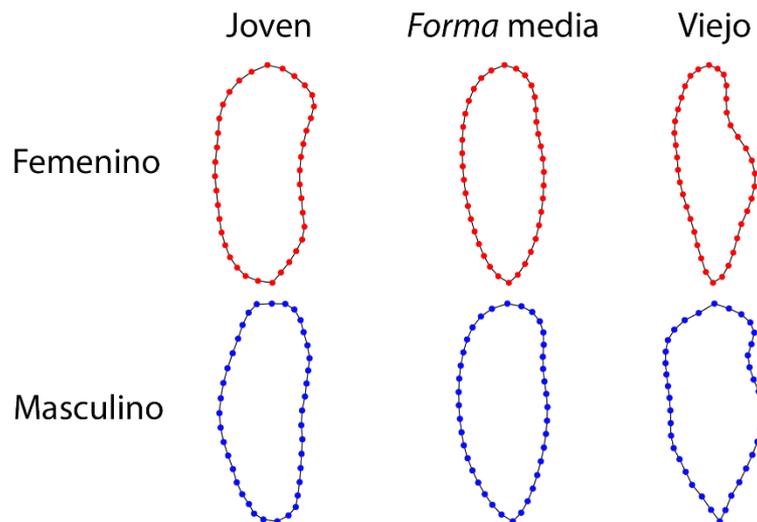


Figura 35. Cambios en la *forma* del contorno de la sínfisis relacionados con la edad. Las formas más viejas y las formas más jóvenes representan dos desviaciones estándar de la *forma* media en la dirección determinada por los vectores de regresión de la *forma*, calculados independientemente para las mujeres en rojo y los hombres en azul. La edad media fue de 42 años para ambos sexos. Las extrapolaciones para *formas* jóvenes y viejas corresponden a las edades de 13 y 71 años para las mujeres y de 16 y 68 años para los hombres.

6.10 DISCUSIÓN: MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA

Investigamos la morfología de la sínfisis con tres objetivos en mente: (1) Explorar si la forma del contorno de la superficie de la sínfisis es sexualmente dimórfica, (2) evaluar si el dimorfismo sexual en el contorno de la sínfisis varía con la edad y cómo, y (3) identificar si la variación en el contorno podría ser informativa para la estimación de la edad al morir.

Aquí mostramos que la *forma* del contorno de la sínfisis púbica es sexualmente dimórfica. Nuestros resultados confirman que un aspecto del tan bien estudiado dimorfismo sexual típico de la pelvis humana (Arsuaga & Carretero, 1994; Fischer & Mitteroecker, 2015, 2017; Kurki, 2011; Tague, 1992; Walrath & Glantz, 1996) también está presente en el contorno de la sínfisis del pubis. En vista lateral, la superficie de la sínfisis masculina es más redondeada y el margen dorsal es más pronunciado, mientras que en la femenina este

margen dorsal es más plano, dando a la sínfisis femenina un aspecto más longilíneo. La tendencia por un margen dorsal aplanado en mujeres es presente a lo largo de todos los grupos de edad. Todd (Todd, 1920) ya consideraba necesario hacer una distinción entre hombres y mujeres al aplicar su método de estimación de la edad al morir porque las diferencias derivadas del sexo podrían afectar potencialmente a la señal de la edad en la sínfisis. Sin embargo, hasta ahora, no estaba claro cuanto diferían cuantitativamente ambos sexos en la *forma* de la sínfisis.

El dimorfismo sexual se desarrolla de manera gradual en muchos sistemas diferentes del esqueleto humano (Bastir et al., 2006; García-Martínez et al., 2020; Huseynov et al., 2016) y esto ocurre generalmente en respuesta a una gran variedad de procesos de desarrollo. Mientras que en la ontogenia postnatal temprana las diferencias entre hombres y mujeres son muy sutiles, durante la adolescencia y posterior estas diferencias esqueléticas se vuelven más marcadas (Cunningham, Scheuer, & Black, 2016). Como en otras partes del esqueleto, las diferencias sexuales en el pubis también se acentúan predominantemente durante la adolescencia (Meindl et al., 1985; Todd, 1920). Nuestros resultados muestran que la *forma* del contorno de la superficie de la sínfisis masculina y femenina divergen predominantemente después del grupo de edad A (14-29 años), que coincide con parte del período reproductivo femenino, pero no con su inicio. Proponemos que estos cambios asociados con la edad podrían ser el resultado de un metabolismo mineral distinto en hombres y mujeres. En mujeres embarazadas, el metabolismo maternal del calcio debe de satisfacer la demanda creada por el feto y la madre. Esta demanda de calcio creada por el feto durante el embarazo y el periodo de lactación del neonato es particularmente alta (Kovacs, 2011; Watney & Rudd, 1974). Para satisfacer esta demanda, el metabolismo materno se adapta y el calcio es movilizado, lo cual puede conducir a un agotamiento a corto plazo del contenido mineral del esqueleto. De hecho, la reabsorción ósea provee la mayoría del calcio necesario para la lactancia (Kovacs, 2011). El efecto acumulativo resultante podría ser responsable de las diferencias sexuales que aparecen después del grupo de edad A en la *forma* del contorno de la superficie de la sínfisis.

Las diferencias entre sexos en las trayectorias de la edad en el contorno de la sínfisis deben de ser tomadas en cuenta cuando estudiamos hombres y mujeres juntos. De hecho, Gilbert and McKern (Gilbert & McKern, 1973) ya mencionaron la necesidad de separar por sexos para aplicar métodos de estimación de la edad al morir. A pesar de que parte de los cambios derivados de la edad son claramente específicos del sexo (capturados por los PC 1 y PC 2 en este análisis), otros patrones derivados de la edad son similares en ambos sexos (PC 3 y PC 4 en este análisis). Los cambios que ocurren en ambos, hombres y mujeres, están asociados predominantemente al borde ventral de la sínfisis, especialmente cuando ocurre el hiato en el tercio superior de este margen ventral en individuos de avanzada edad (Todd, 1920). Los cambios descritos en el PC 4 en la anchura relativa de las partes superior e inferior de la sínfisis ocurren independientemente del sexo al incrementar la edad. Esto se encuentra probablemente relacionado con los procesos degenerativos típicos de edades avanzadas (Fig. 6).

Aquí mostramos que la forma del contorno de la sínfisis cambia con la edad. Sin embargo, nuestros resultados indican que esta asociación tiene poder de estimación hasta alrededor de los 50 años de edad y que esta señal desaparece a mayor edad (Fig. 5). Este hallazgo está de acuerdo con los resultados de Meindl et al. (Meindl et al., 1985) en que la capacidad de la sínfisis del pubis para estimar la edad al morir desaparece en la última fase que Todd describió a partir de los 50 años (Todd, 1920).

Estos hallazgos muestran que la *forma* del contorno de la sínfisis púbica humana es sexualmente dimórfica y que este contorno cambia con la edad; esto podría usarse para mejorar la exactitud de los métodos existentes de estimación del sexo y de la edad al morir junto con la información de otros elementos esqueléticos.

Capítulo 7

La matriz de co- ocurrencia de escala de grises

7.1 INTRODUCCIÓN A LA MATRIZ DE CO-OCURRENCIA DE ESCALA DE GRISES

Tras el intento de aplicar técnicas de morfometría geométrica y los resultados obtenidos, tuve que reflexionar. Como ya se ha dicho, la sínfisis púbica contiene información sobre la edad, sin embargo, no fui capaz de cristalizarla suficientemente bien como para estimar la edad mejor que como se está haciendo. Si la propia morfometría geométrica no es el problema, tendría que ser la toma de datos. El proceso de localizar landmarks había sido complicado desde el principio. Tenía que buscar otra forma de analizar la superficie articular del pubis.

Una herramienta muy utilizada en el análisis de textura de imágenes es la matriz de co-ocurrencia basada en escala de grises, se utiliza a día de hoy en estudios de biodiversidad y conservación de amplias extensiones de terreno (generalmente imágenes tomadas con drones o satélite), crecimiento y desarrollo de ciudades a lo largo del tiempo o análisis clínico, entre otros (Eichkitz, Amtmann, & Schreilechner, 2013; Lefebvre & Corpetti, 2016; Marrón, 2012; Partio, Cramariuc, Gabbouj, & Visa, 2002; Pulido, Solaque, & Velasco, 2017; Shi et al., 2018; Wallis et al., 2017). Esta herramienta cuenta con un buen poder de discriminación de patrones y tiene potencial para ser aplicado en antropología física.

La textura es una propiedad intrínseca de una superficie. Puede ser parametrizada con el uso de métodos estadísticos que caractericen las propiedades estocásticas en la distribución espacial de la escala de grises de una imagen (Haralick, 1979). El procedimiento estándar para esta parametrización se basa en una matriz de co-ocurrencia de escala de grises, introducida por Robert M. Haralick (Haralick, 1979). En resumen, la información de la textura es representada por una matriz de frecuencias relativas P_{ij} en la que aparecen celdas vecinas separadas por una distancia geométrica fija (dx , dy), una con un tono de gris i y la otra con un tono de gris j . A partir de la frecuencia con la cual se producen diferentes combinaciones de valores en la escala de grises en una imagen, se pueden calcular diferentes parámetros

(correlacionados entre sí) que, en última instancia, valdrán para relacionar la textura de una superficie articular con la edad al morir de un individuo.

Haralick describió catorce características no independientes que se pueden extraer de esta matriz de co-ocurrencia en escala de grises. Con ellas demostró que, aplicadas a fotografías tomadas con satélite (y en grandes áreas de terreno), estos 14 parámetros podrían diferenciar el agua de las llanuras, diferentes tipos de roca y bosques de zonas urbanas. Al no ser independientes unas de otras, es raro encontrarse un estudio que calcule todas (Zayed & Elnemr, 2015). Las más comunes son:

Energía: también conocida como segundo momento angular, mide la uniformidad de la textura, que es, la repetición de parejas de pixel. Cuando la imagen a analizar es homogénea (los valores de gris son similares), la energía alcanza el máximo. Encontraremos altos niveles de energía cuando la distribución de grises a lo largo de la imagen es constante o periódica.

Entropía: mide el desorden en la imagen. Cuando la textura no es uniforme, la entropía incrementa. Conceptualmente, la energía y la entropía están inversamente correlacionadas.

Contraste: mide la variación lineal presente en la imagen. Se basa en las diferencias entre los valores más altos y más bajos contiguos en un set de píxeles.

Homogeneidad: mide exactamente eso, cómo de homogénea es la imagen. Asume valores elevados cuando la diferencia en las parejas de valores de gris es pequeña. También esta inversamente correlacionada con la energía (Figura 36).

$$\begin{aligned} \text{Energía: } & \sum_i \sum_j p(i, j)^2 \\ \text{Entropía: } & -\sum_i \sum_j p(i, j) \log(p(i, j)) \\ \text{Contraste: } & \sum_{n=0}^{N_g-1} n^2 \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} \{p(i, j)\} \\ \text{Homogeneidad: } & \sum_i \sum_j \frac{1}{1+(i-j)^2} p(i, j) \end{aligned}$$

Figura 36. Fórmulas de los descriptores de la textura que se van a utilizar en este estudio.

Estos cuatro parámetros son los que mejor se ajustan a la información que queremos extraer de la superficie articular del pubis. Sin embargo, debemos de tener en cuenta que la matriz de co-ocurrencia de escala de grises trabaja con imágenes 2D. Además, del color de la imagen dependerán los valores de gris cuando transformemos la imagen. Los restos óseos puede cambiar su coloración por diversos motivos, por ello, hacer una fotografía de la superficie articular no puede estandarizarse.

Para que nuestra muestra siempre tenga un color similar y podamos estandarizar un método de estimación de la edad, los modelos digitalizados en 3D nos permiten modificar el color de la nube de puntos y estandarizarlo en código RGB, permitiendo que cualquier pubis que sea digitalizado pueda obtener los mismos valores de la escala de grises. Para llevar a cabo esta tarea, se diseñó un script para R (R-Core Team, 2017), haciendo todo el proceso desde cargar la imagen hasta obtener el valor de cada parámetro sea sencillo y semi-automático.

Al elegir un rectángulo encuadrado dentro de la superficie articular, es de esperar que, a partir de la edad en la que la superficie articular es suavizada y no queda rastro de las crestas y valles, la señal que utilizamos para estimar la

edad desaparecerá. Por ello, se repitieron los análisis sin límite de edad y con límite a los 35 años, cuando se supone que la sínfisis no presenta mayores cambios (Meindl et al., 1985; Todd, 1920).

7.2 PREPARACIÓN DE LAS IMÁGENES

Para poder implementar este método, la coloración del pubis antes de transformar la imagen a escala de grises debe de ser la misma, de tal modo que los grises obtenidos estarán libres del ruido de diferentes colores (Haralick, 1979). Si un pubis tiene una coloración irregular, una vez es transformado a escala de grises, creará artefactos parecidos a la sombra proyectada por los valles y las crestas propias de un individuo joven. Por esto, trabajar con los modelos en 3D es la única manera de asegurar que no encontraremos artefactos.

Para crear esta segunda colección formada por imágenes, utilizando solo el lado izquierdo de cada individuo, se asignó el mismo color arbitrariamente para todos los modelos tridimensionales de los pubis (RGB: 255, 128, 128). Para alinearlos, se crearon dos puntos imaginarios, uno en la zona superior y otra en la inferior de la sínfisis; en visión ortográfica, se alineó la línea creada entre estos dos puntos paralelamente con el margen derecho de la pantalla del ordenador. Posteriormente, se giró el pubis sobre este eje imaginario hasta que mostraba en pantalla el máximo porcentaje de superficie articular. Con la sínfisis posicionada y los puntos creados eliminados, se crearon imágenes de todos los pubis, siempre en escala 1:1.

Para transformar estas imágenes en escala de grises, cualquier editor de imagen puede hacerlo, en este caso se utilizó GIMP (Solomon, 2009) con la herramienta de transformar la imagen a escala de grises.

El paso crucial para este método es seleccionar un fragmento de cada pubis que sea siempre del mismo tamaño y que siempre contenga la superficie articular, es decir, en el fragmento tomado (el cual se utilizará para crear la matriz de co-ocurrencia) solo puede verse la superficie articular, nunca un borde o el

fondo detrás del hueso. Elegir un tamaño estandarizable y aplicable para toda la colección y que, además, fuera capaz de representar la totalidad de la superficie articular no fue sencillo. Tras diversas pruebas, una sección de 100x100 píxeles fue tomada de cada pubis izquierdo. Para ello, se utilizó la línea imaginaria creada por los puntos superior e inferior que elegimos previamente, el centro del rectángulo de 100x100 píxeles tiene que coincidir con esta línea. Todas las selecciones se hicieron en el primer tercio de esta línea longitudinal, donde la sínfisis es más ancha (Figura 37).

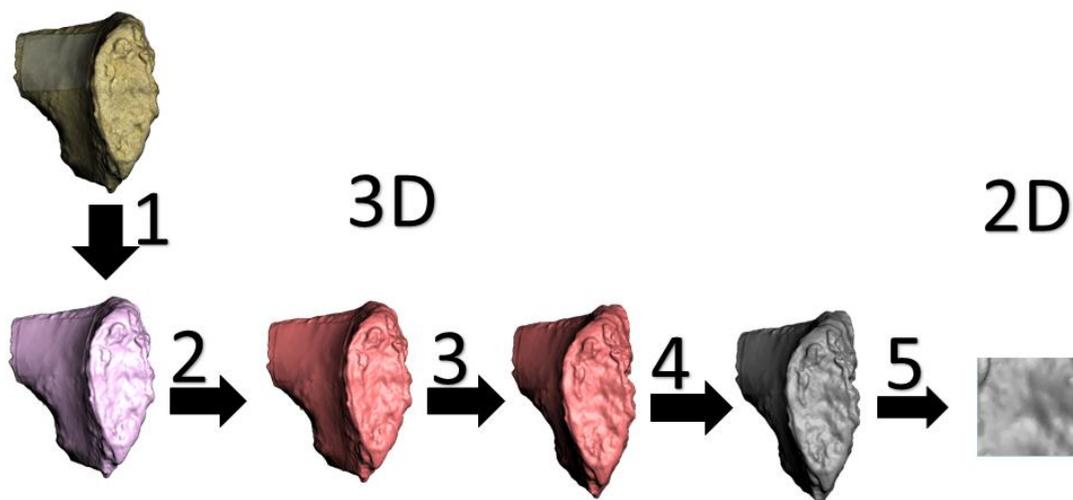


Figura 37. Proceso de obtención de las imágenes necesarias para la matriz de co-ocurrencia de escala de grises. Empezando con el pubis digitalizado en 3D, se elimina la textura (1), se cambia a un color estandarizado RGB: 255, 128, 128 (2), se alinea la superficie de la cara articular para exponer en pantalla tanta sínfisis como sea posible (3), se transforma a escala de grises (4) y se toma un recuadro de 100x100 píxeles (5). Todo el proceso se lleva a cabo en visión ortográfica.

Cada imagen de 100x100 píxeles fue guardada en formato .jpg para su posterior análisis en R (R-Core Team, 2017).

7.3 RESULTADOS DE LA MATRIZ DE CO-OCURRENCIA

El área del rectángulo que se ha tomado de cada pubis debe de ser pequeña para que no se tengan que descartar pubis debido a que el área del rectángulo pueda ajustarse dentro de la superficie articular sin tocar ningún borde. También, al tener un reducido número de pixeles, el análisis puede hacerse rápido. Desde que se carga una imagen en R hasta que se obtienen los valores de energía, entropía, contraste y homogeneidad, pasan unos 4 minutos por pubis con un ordenador de media gama.

Como se especificó en la introducción de este método, el análisis se divide en dos, sin límite de edad e individuos solo hasta los 35 años de edad:

Sin límite de edad:

Se analizaron 206 imágenes del lado izquierdo de 205 varones de edades comprendidas entre 15 y 82 años. De cada imagen derivan cuatro valores para los cuatro parámetros que estamos estudiando: Energía, Contraste, Entropía y Homogeneidad. Dado que los cuatro parámetros están altamente correlacionados entre sí, directa o inversamente, se realizaron cuatro regresiones lineales entre la edad real y los parámetros mencionados. El parámetro mejor correlacionado con la edad es la Entropía, o el desorden en la imagen, sin embargo, esta correlación es pequeña ($cor = 0,335$). Los modelos produjeron las siguientes correlaciones:

Energía, correlación con la edad real de 0,257 (Figura 38).

a) Regresión de Edad real con la Energía, $\text{corr}(\text{Edad}, \text{Energía}) = 0,257$

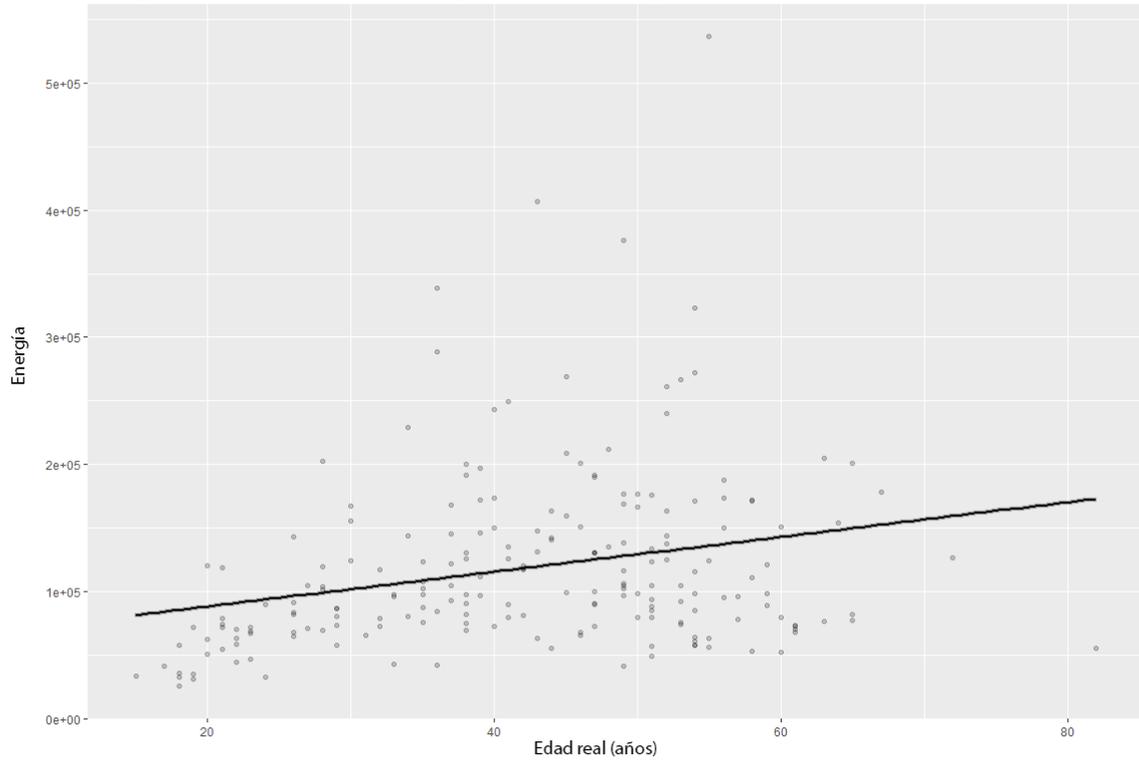


Figura 38. Regresión lineal entre la edad real y la energía.

Contraste, correlación con la edad real de $-0,331$ (Figura 39).

b) Regresión de la Edad real con el Contraste, corr (Edad, Contraste) = -0,331

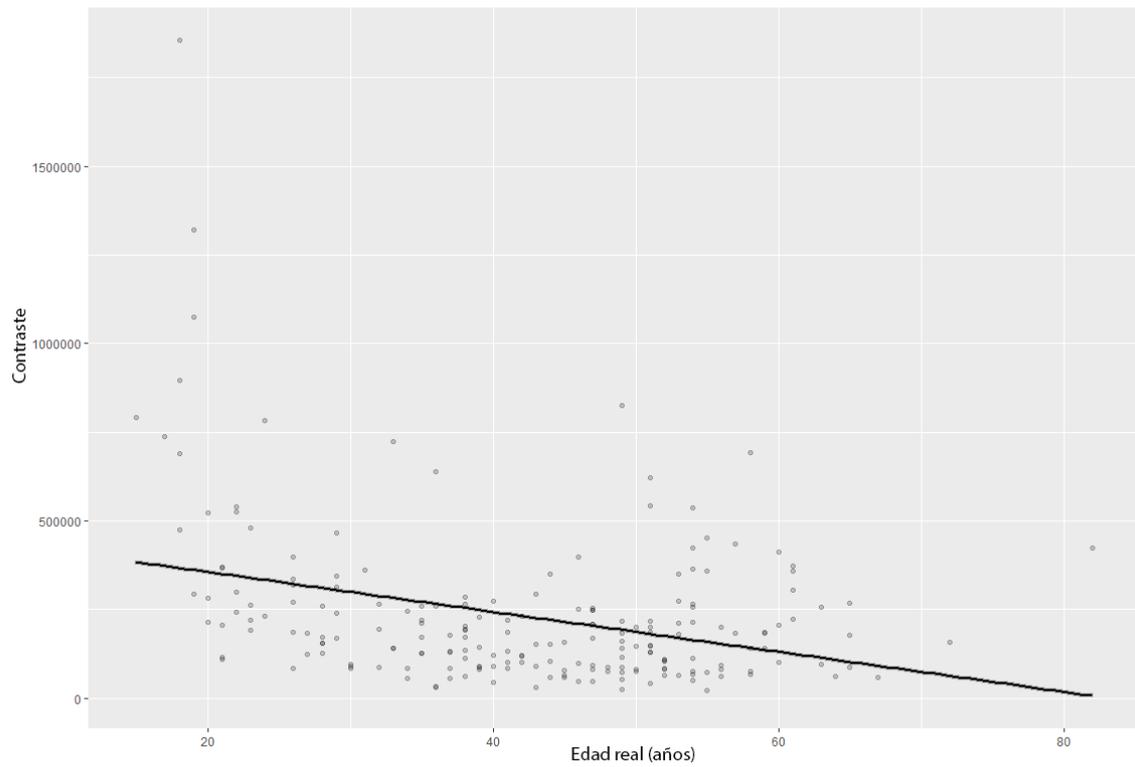


Figura 39. Regresión lineal entre la edad real y el contraste

Entropía, correlación con la edad real de 0,335 (Figura 40).

c) Regresión de la Edad real con la Entropía, corr (Edad, Entropía) = 0,335

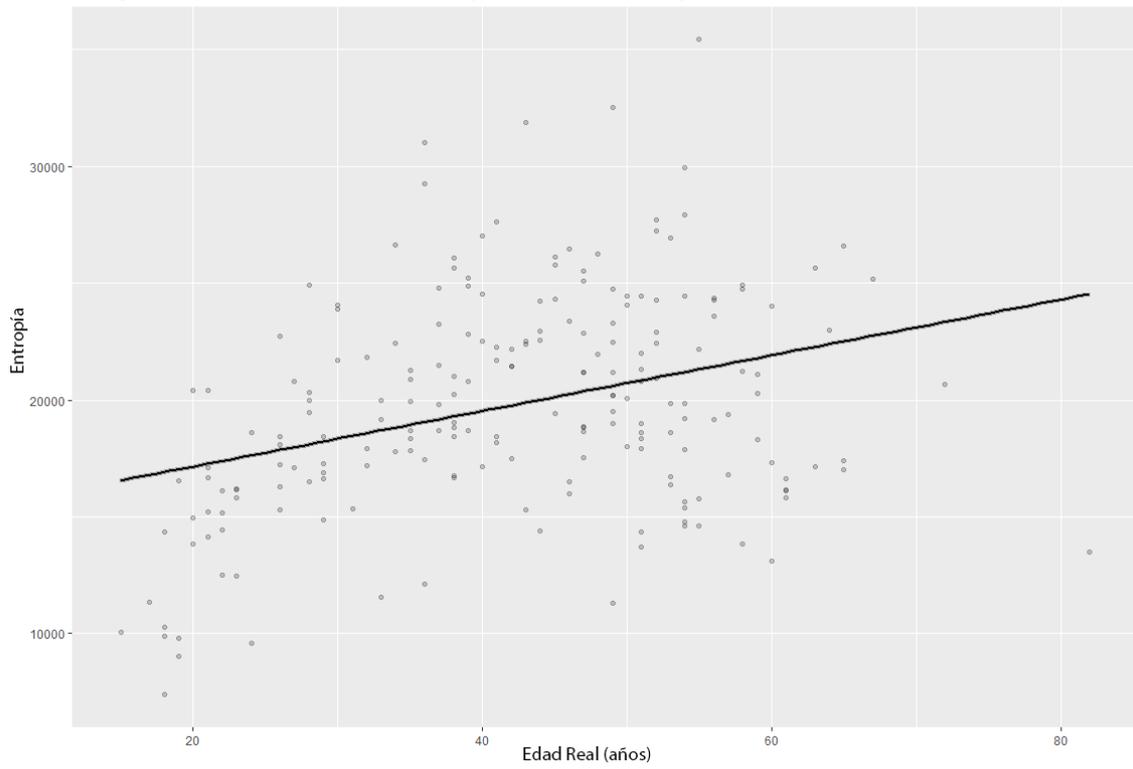


Figura 40. Regresión lineal entre la edad real y la entropía.

Homogeneidad, correlación con la edad real de 0,293 (Figura 41).

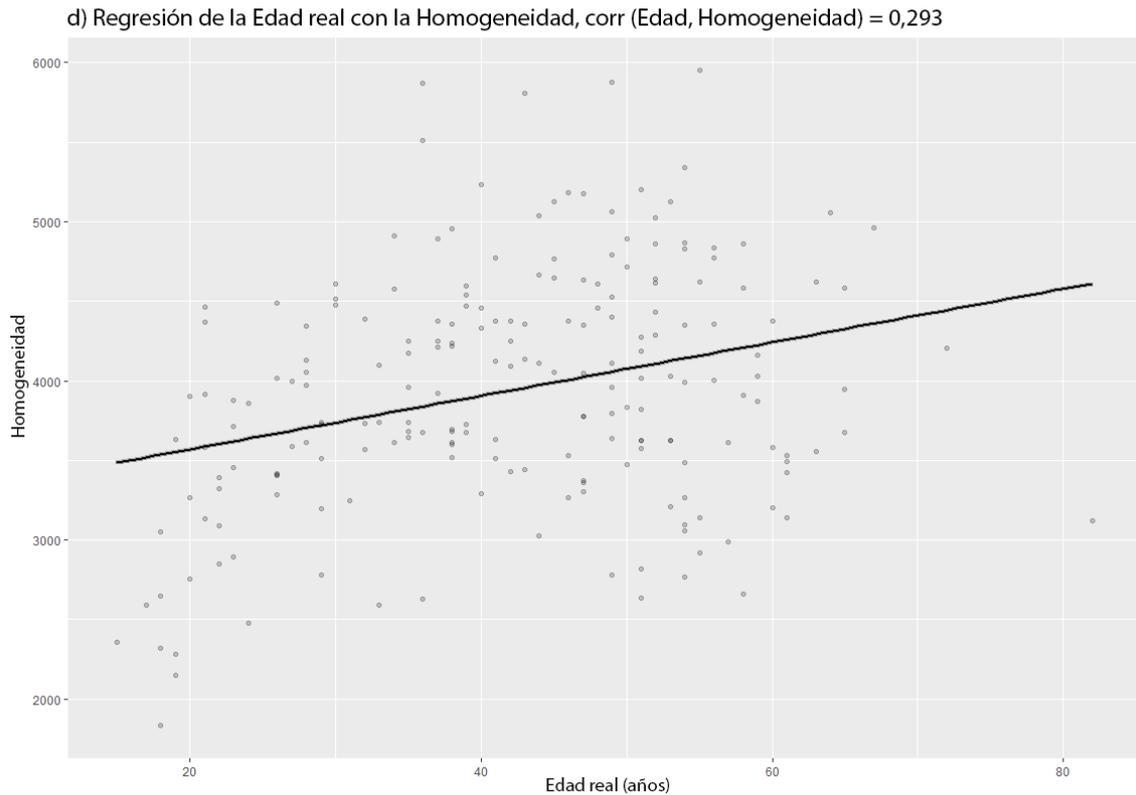


Figura 41. Regresión lineal entre la edad real y la homogeneidad

Solo individuos más jóvenes que 35 años:

Se analizaron 64 imágenes del lado izquierdo de 64 individuos de edades comprendidas entre 15 y 35 años (incluido). De cada imagen se obtuvieron los valores de Energía, Contraste, Entropía y Homogeneidad. Los cuatro parámetros están altamente correlacionados entre sí y el parámetro con mayor correlación con la edad es la Entropía ($\text{cor} = 0,637$). Los modelos produjeron las siguientes correlaciones:

Energía, correlación con la edad real hasta los 35 años de 0,536 (Figura 42).

a) Regresión de la Edad real (<35) con la Energía, corr (Edad<35, Energía) = 0,536

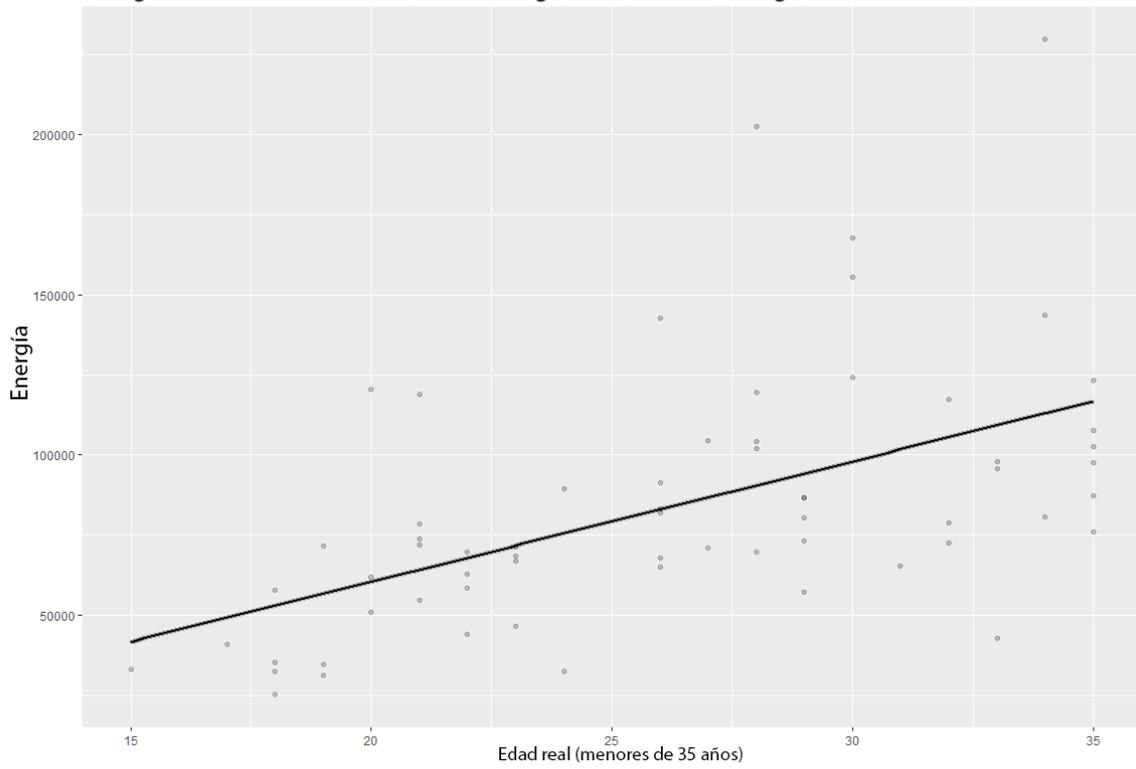


Figura 42. Regresión lineal entre la edad real (individuos menores de 35) y la energía.

Contraste, correlación con la edad real hasta los 35 años de -0,539 (Figura 43).

b) Regresión de la Edad real (<35) con el Contraste, corr (Edad<35, Contraste) = -0,539

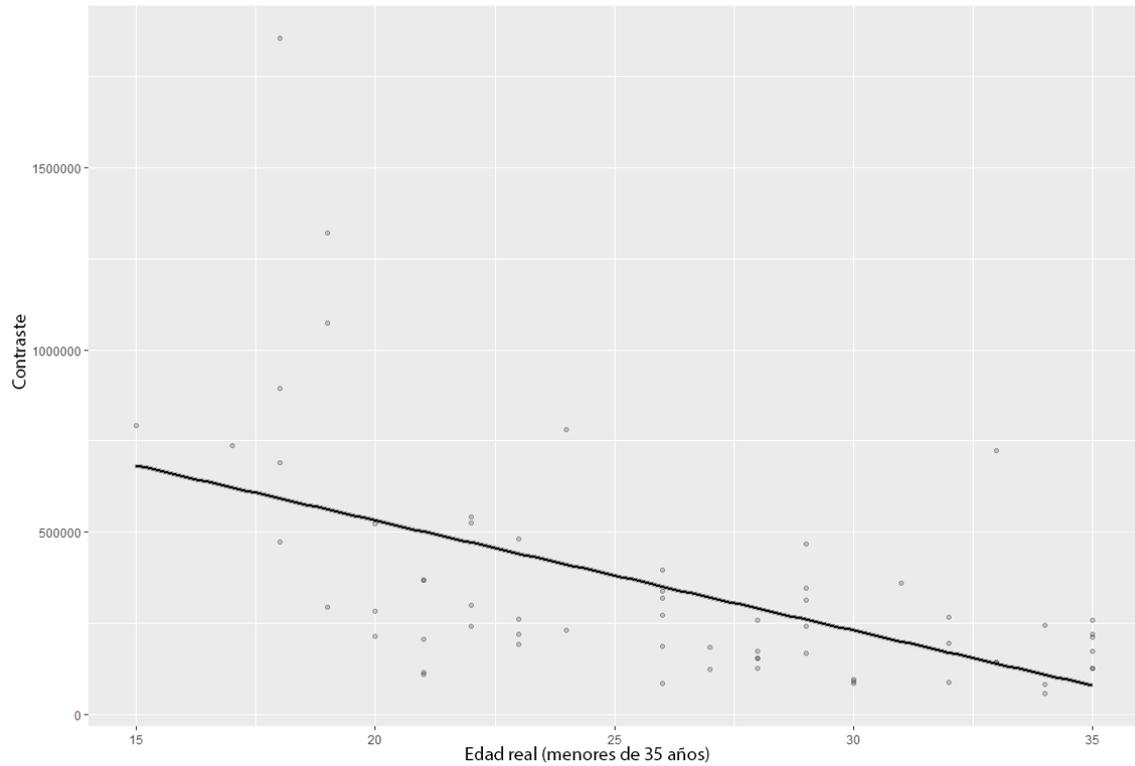


Figura 43. Regresión lineal entre la edad real (individuos menores de 35) y el contraste.

Entropía, correlación con la edad real hasta los 35 años de 0,637 (Figura 44).

c) Regresión de la Edad real (<35) con la Entropía, corr (Edad<35, Entropía) = 0,637

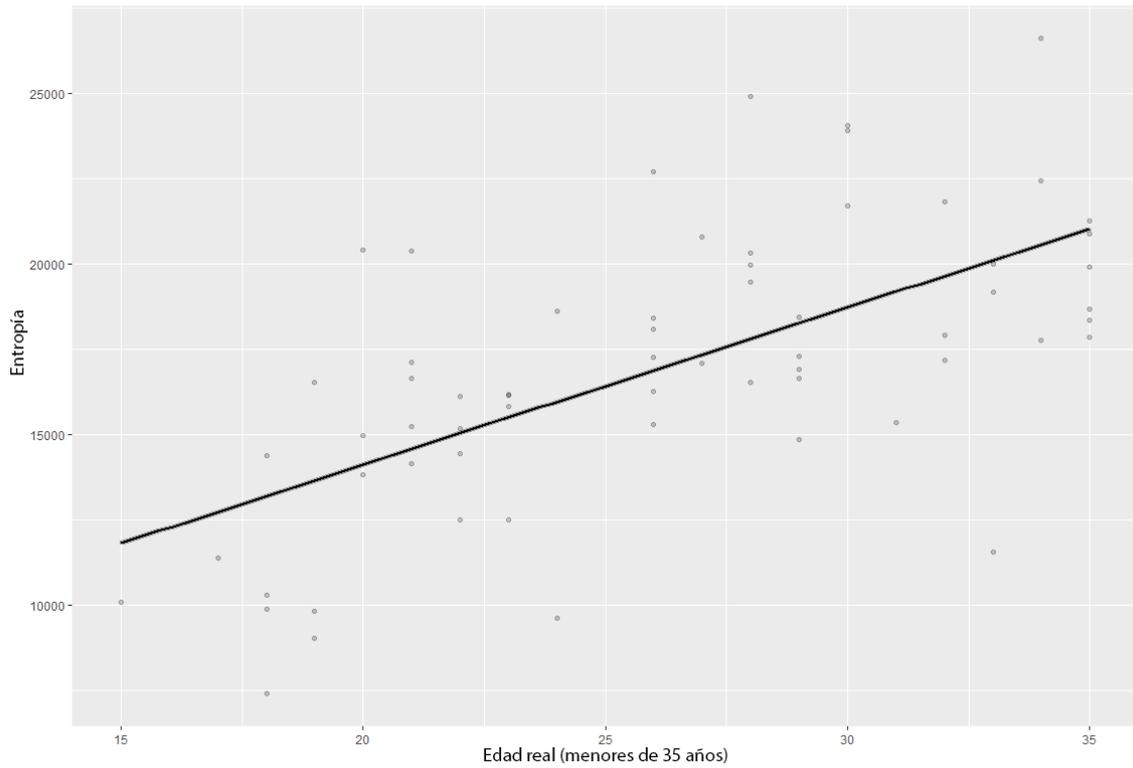


Figura 44. Regresión lineal entre la edad real (individuos menores de 35) y la entropía

Homogeneidad, correlación con la edad real hasta los 35 años de (Figura 45).

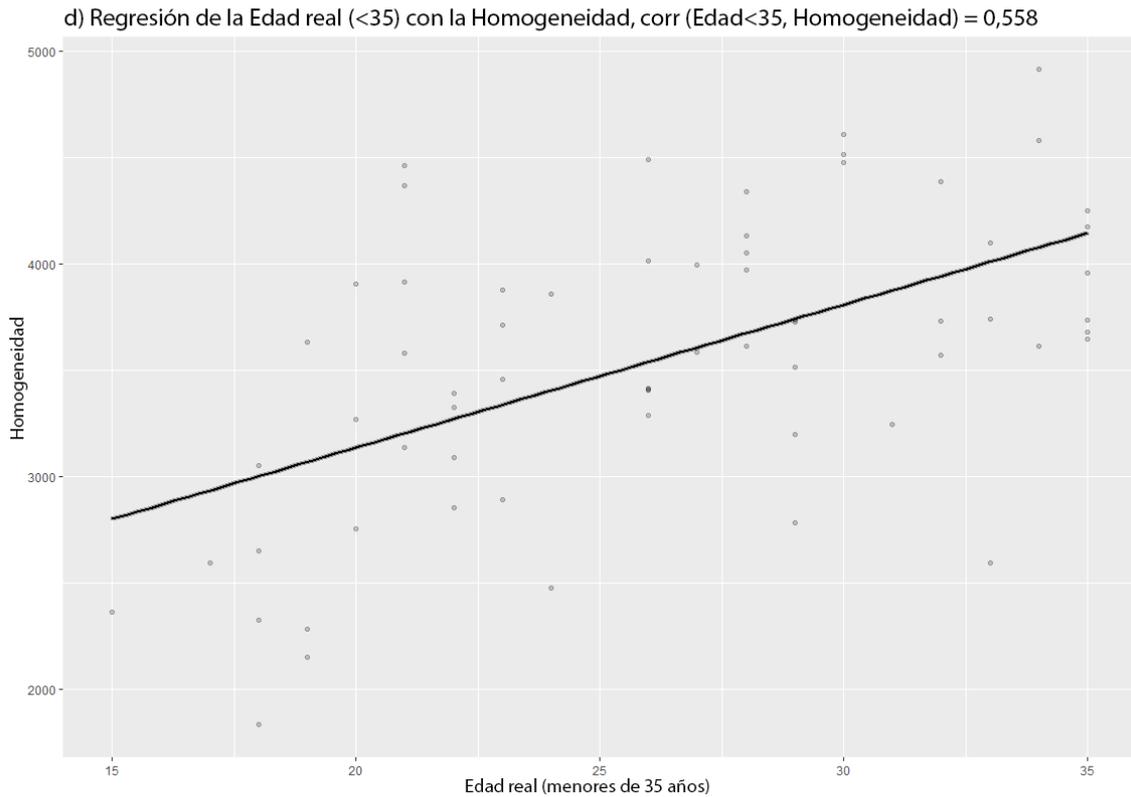


Figura 45. Regresión lineal entre la edad real (individuos menores de 35) y la homogeneidad.

En ambos casos, la energía, entropía y homogeneidad aumentan conforme avanza la edad, especialmente en los primeros 35 años. El contraste disminuye con la edad. Debido a que todos estos factores están correlacionados entre sí (Figura 46), no es posible realizar una regresión lineal múltiple (Uyanık & Güler, 2013).

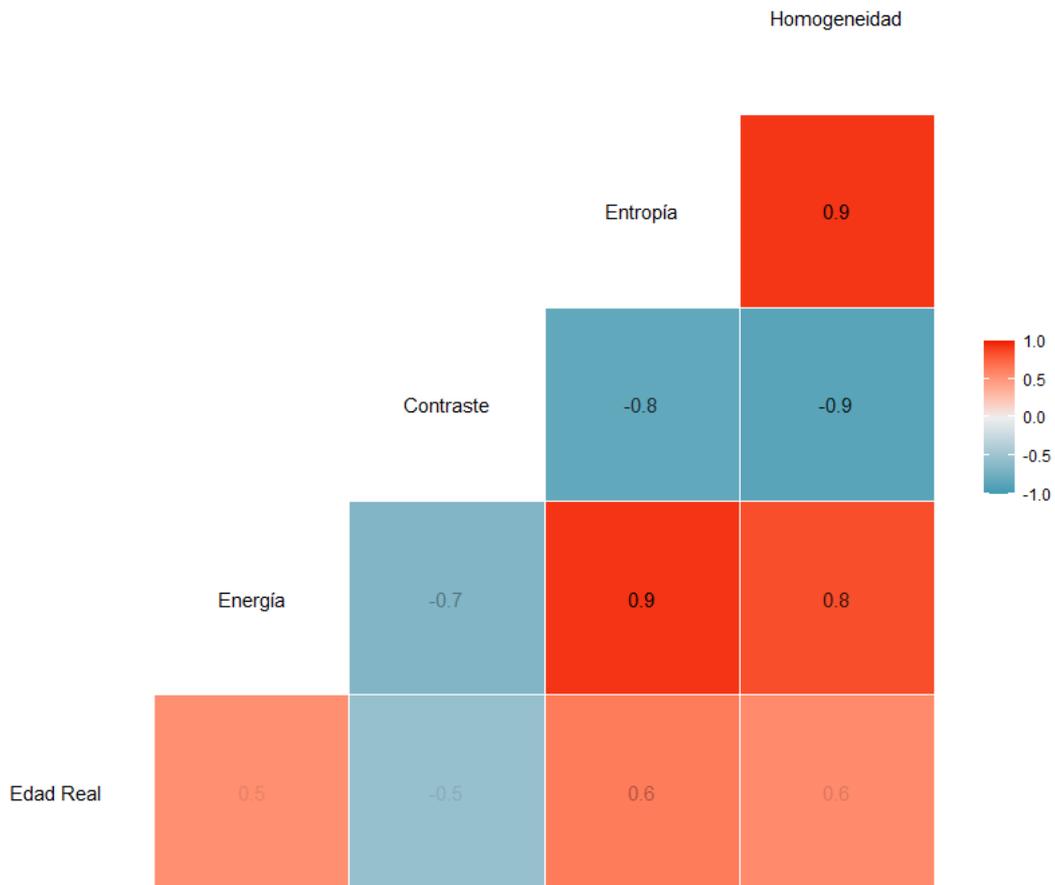


Figura 46. Pirámide de correlaciones entre los descriptores de la textura y la edad por debajo de los 35 años. Los tonos azules muestran correlaciones negativas, más fuertes según la intensidad del azul. Los tonos rojizos son para correlaciones positivas. Las correlaciones entre los descriptores energía, contraste, entropía y homogeneidad son muy altas debido a que son calculados a partir de la misma matriz de escala de grises.

7.4 DISCUSIÓN: MATRIZ DE CO-OCURRENCIA DE ESCALA DE GRISES

Los resultados muestran modelos cuantitativos del cambio de la textura de la sínfisis del pubis con la edad. Si bien estos modelos no han sido validados, estos representan un primer paso hacia la generación de algoritmos para la estimación de la edad basados en el análisis cuantitativo de la textura de una imagen.

La estimación de la edad al morir se basa en cambios en la estructura ósea y la textura de la superficie articular del pubis a lo largo de gran parte de la vida del individuo (Algee-Hewitt, 2017; Brooks & Suchey, 1990; Todd, 1920). El estudio del proceso de metamorfosis de la sínfisis del pubis es especialmente adecuado para este tipo de metodología porque la obliteración de las crestas que ocurre en las primeras décadas de la vida adulta es muy fácil de “rastrear” cuando estudiamos cambios en su textura. La naturaleza (que asumimos) lineal de la relación entre los parámetros de la textura (energía, contraste, entropía y homogeneidad) y la edad genera varios inconvenientes debido a que esta metamorfosis biológica no parece lineal en todo su recorrido. La predicción de la edad a partir de los parámetros de textura es intrínsecamente más propensa a errores en edades más avanzadas: por encima de los 35 años, pequeños cambios en los parámetros de textura implican grandes cambios en la edad estimada (ver figuras), simplemente porque la tasa de cambio de los parámetros de la textura con la edad es muy próxima a 0.

Hasta cierto punto, la elección de un parámetro específico sobre los demás es relativamente intrascendente, ya que se basan en manipulaciones de los mismos elementos de una matriz y simplemente difieren en qué elementos de la matriz se ponderan como más influyentes, lo que conduce a fuertes correlaciones entre los parámetros. Además, las superficies óseas raramente presentan áreas de gran contraste y gran homogeneidad al mismo tiempo. Dado que las superficies óseas de la sínfisis púbica son menos lisas a edades más tempranas, las sombras oscuras y los reflejos fuertes disminuyen con la edad, mientras que el brillo general aumenta, lo que reduce el contraste y aumenta la homogeneidad, la energía y la entropía. El contraste está influenciado más fuertemente por combinaciones de valores de escala de grises altamente desiguales que representan elementos de índices altamente desiguales en la matriz de co-ocurrencia correspondiente a superficies con crestas y valles, lo que resulta en la disminución exponencial del Contraste con la edad. En comparación, la homogeneidad se ve más influenciada por combinaciones de valores de escala de grises muy similares que representan elementos cercanos a la diagonal principal de la matriz de co-ocurrencia que corresponde a las

superficies más planas y homogéneas de la sínfisis púbica en edades más altas, lo que resulta en un aumento logístico de homogeneidad con la edad.

Los valores absolutos de los parámetros de la textura dependen, entre otras cosas, del tamaño de la imagen seleccionada para el análisis (Haralick, 1979). Los valores absolutos de Entropía, Energía, Homogeneidad y Contraste dependen, también, de la resolución de la escala de grises. Un inconveniente de este método es su restricción al análisis de imágenes rectangulares, por lo que obliga a elegir un tamaño de imagen determinado, que luego se selecciona consistentemente de las imágenes de las superficies óseas. El tamaño de la imagen también actúa como un filtro: no se pueden analizar características mayores que el tamaño de la imagen. Dado que las superficies óseas varían en tamaño entre individuos y dado que el análisis de textura solo funciona si el recuadro seleccionado contiene solo superficie de la sínfisis, el tamaño óptimo del rectángulo representa un “trade-off”: los tamaños de imagen más grandes pueden llevar a la exclusión de individuos de la muestra y a tiempos de cálculo más largos, mientras que los tamaños de imagen más pequeños limitan la información derivada del análisis de textura.

El análisis cuantitativo de la textura se ha utilizado en varios campos, sustituyendo análisis largos, subjetivos y dependientes de expertos, con algoritmos que proporcionan análisis rápidos, económicos y fiables (Eichkitz et al., 2013; Haralick, 1979; Lefebvre & Corpetti, 2016; Marrón, 2012; Partio et al., 2002; Pulido et al., 2017; Shi et al., 2018; Wallis et al., 2017; Zayed & Elnemr, 2015). A medida que los escáneres de superficie 3D se vuelven más accesibles y asequibles, se nos presenta la oportunidad de utilizar este boom de nuevas colecciones digitales para generar herramientas de análisis económicas y efectivas que pueden ser aplicadas por un gran grupo de personas con poca formación. Este método es un primer paso en esta dirección y pretende ser una prueba del concepto de análisis cuantitativo de la textura para la estimación de la edad. Dado que la información de color no es necesaria para el análisis de textura, es suficiente cualquier escáner 3D económico de resolución comparable (por ejemplo, escáneres láser). Además, los escaneos 3D de huesos están cada vez más disponibles en bases de datos de uso gratuito (G. W. Weber, 2015) y los pasos para transformar las imágenes no requieren software de pago

(Freeware como GIMP ofrece todas las funcionalidades necesarias) y el análisis se realiza en R.

Si bien estos resultados no son suficientes para dar por alcanzados los objetivos de esta tesis, sí que muestran margen de mejora. Las transformaciones necesarias de la muestra para ser aptas para este tipo de análisis tienen mucho que ver con los resultados, creo que estos podrían ser mejores, pero no llegar a cubrir mucho más margen de edad, lo cual le hace perder mucha efectividad en cualquier contexto forense.

Capítulo 8

La energía de torsión

8.1 INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA DE TORSIÓN

Hasta ahora nos hemos referido a la energía de torsión como uno de los métodos de optimización del deslizamiento de semilandmarks (Gunz & Mitteroecker, 2013; Gunz et al., 2005) y uno de los parámetros que For Age calcula para estimar la edad al morir con la sínfisis del pubis (Slice & Algee-Hewitt, 2015; D. Stoyanova et al., 2015; D. K. Stoyanova et al., 2017). Fue introducida por Fred Bookstein en 1989 (F. L. Bookstein, 1989) como la energía mínima necesaria para doblar una placa de metal perfectamente plana e infinitamente delgada para coincidir con la superficie objetivo.

Dado que el método elegido para el deslizamiento de nuestros semilandmarks de superficie fue minimizar la energía de torsión, podemos extraer este valor de Viewbox 4 (Halazonetis, 2014) para cada pubis. Este software calcula la cantidad de energía necesaria para transformar la plantilla en la superficie sobre la que es proyectada, de una forma muy similar a la que For Age calcula este parámetro.

Desde un principio, la idea era exploratoria. Simplemente por el hecho de que Viewbox 4 proyecta una plantilla sobre la muestra, presenta problemas a la hora de estandarizar el método. Viewbox 4, si bien es capaz de realizar algunos análisis, no es la opción óptima para lo que se iba a intentar. La idea de la energía de torsión resultaba muy atractiva dado que encaja muy bien con la metamorfosis del pubis. Durante el proceso de digitalización en 3D ya se pudo ver que las nubes de puntos eran más simples en individuos que pasaban de los 30 años, si algún pubis ocasionaba problemas para ser escaneado era uno de los jóvenes por su intrincada superficie articular. La idea de que la energía de torsión sería máxima en individuos jóvenes y que esta iría decayendo según la superficie articular fuera aplanándose y el borde exterior estuviera totalmente formado no es original (Slice & Algee-Hewitt, 2015; D. Stoyanova et al., 2015; D. K. Stoyanova et al., 2017) pero quería ver si podía abordar el problema de forma diferente a como lo hicieron Stoyanova y su grupo.

La otra duda que surgía era si la energía de torsión disminuiría indefinidamente. No es coherente pensar que sí, dado que los procesos

degenerativos que ocurren en la sínfisis púbica a partir de los 50 años como las labiaciones en los bordes, incremento de la porosidad o la rotura de márgenes harían que la superficie articular sea más irregular y compleja, incrementando el valor de energía de torsión y eliminando o, como mínimo, empeorando la capacidad predictiva del modelo (Figura 47).

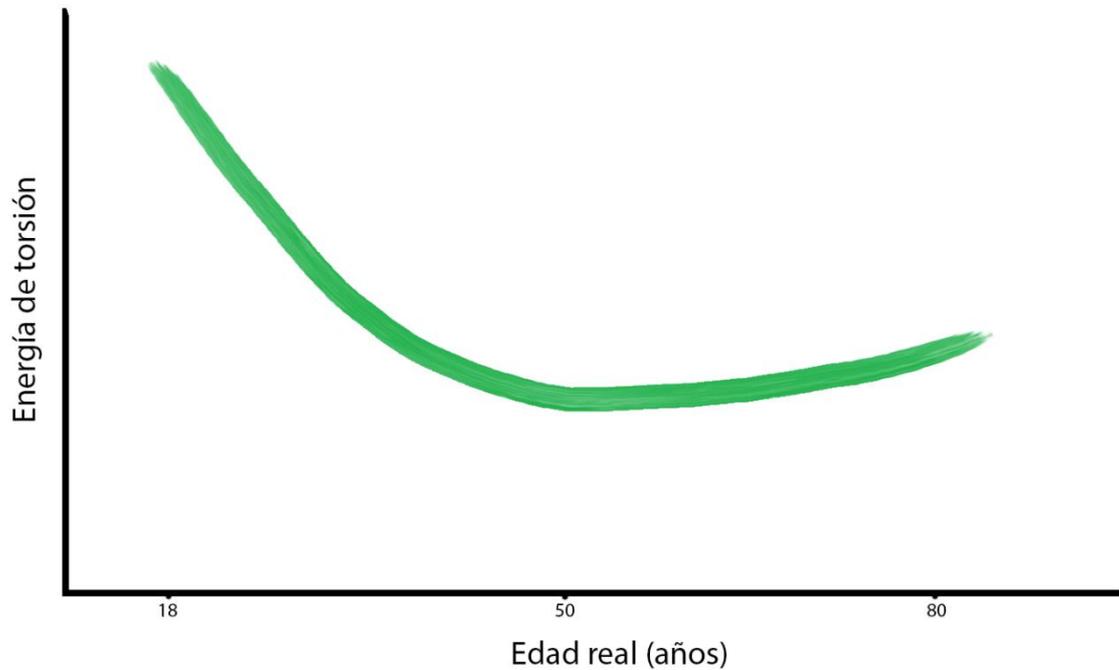


Figura 47. Boceto del comportamiento esperado de la energía de torsión en relación con la edad. Debido a los cambios degenerativos que ocurren especialmente tras los 50 años de edad, los valores de energía de torsión para esos pubis podrían ser altos y, por lo tanto, distorsionando la capacidad de la energía de torsión para estimar la edad en el rango completo de esta.

El plan inicial era comprobar cómo se comportaba la energía de torsión y ver las diferencias entre individuos muy jóvenes y con qué pendiente disminuiría según aumenta la edad. De dar buenos resultados, sería fácil transformar un valor de energía de torsión en una edad y, a pesar de que en este caso iba a usar la plantilla y las proyecciones de Viewbox 4 de una manera algo rudimentaria, es posible crear un software capaz de calcular este valor.

8.2 ENERGÍA DE TORSIÓN EN VIEWBOX4

La energía de torsión es calculada utilizando las siguientes funciones radiales según el manual de usuario de Viewbox 4 (Halazonetis, 2014):

Para datos en 2D: $r^2 \ln(r^2)$, donde “ln” es el logaritmo natural y “r” es la distancia entre dos puntos.

Para datos en 3D: r.

Los pasos a seguir son los mismos que para el proceso de colocación de los landmarks y semilandmarks, una vez llegas al deslizado de semilandmarks y eliges la energía de torsión como criterio de optimización, tan solo tienes que pedir al programa el resultado de este parámetro. Viewbox 4 calcula la energía de torsión y energía de torsión “normalizada”. Sin embargo, debido que no he podido encontrar que proceso sigue este software para normalizar la medida, he descartado el parámetro normalizado.

8.3 RESULTADOS DE LA ENERGÍA DE TORSIÓN

La energía de torsión necesaria para el deslizamiento de semilandmarks desde la plantilla a cada individuo varía entre 20,03 puntos a 184,17. Al calcular la correlación entre la edad real del individuo y la energía de torsión calculada por Viewbox 4 obtuvimos -0,358 puntos. Un modelo lineal no se ajusta a la nube de puntos debido a que, a edades avanzadas, los valores de energía de torsión vuelven a ser altos (Figura 48).

a) Regresión de la Edad real con la Energía de torsión, corr (Edad, ET) = -0,358

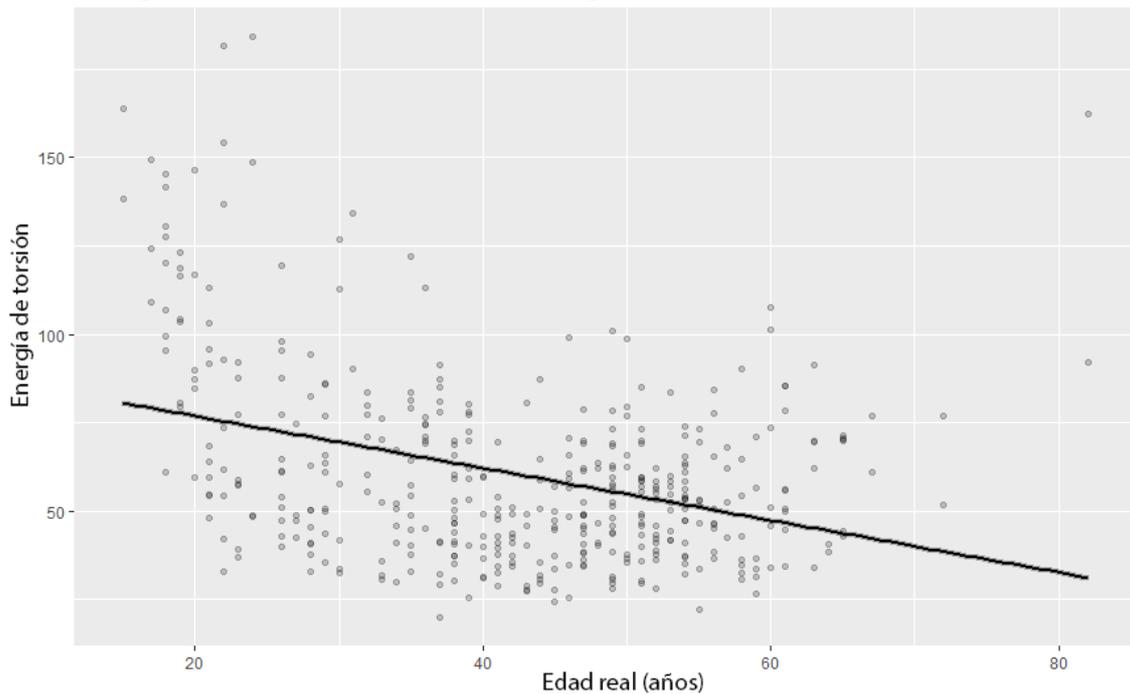


Figura 48. Regresión lineal entre la edad real en años y la energía de torsión calculada por Viewbox 4. Si bien los individuos jóvenes presentan altos valores de energía de torsión, según la edad crece, también lo hace la dispersión de los valores. A partir de los 50 años de edad podemos ver una subida en la energía de torsión, siendo casi tan alta en individuos muy viejos tanto como en los muy jóvenes.

Se realizó de nuevo el análisis acotando la edad de los individuos, dejando como edad máxima los 50 años de edad. Esta vez la correlación fue de -0,536 y el modelo lineal se ajusta mejor a la nube de puntos de la muestra (Figura 49).

b) Regresión de la Edad real (<50) con la Energía de torsión, corr (Edad<50, ET) = -0,536

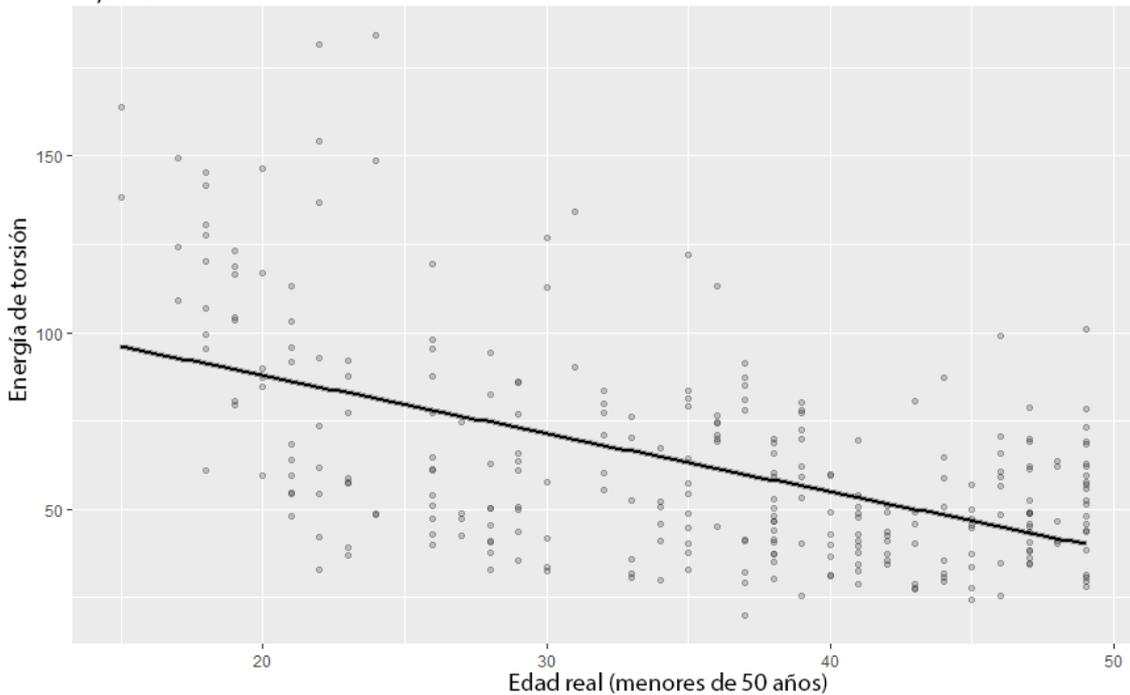


Figura 49. Regresión lineal entre los individuos menores de 50 años y la energía de torsión calculada por Viewbox 4. En este caso podemos ver como al crecer la edad, disminuye la energía de torsión.

8.4 DISCUSIÓN: ENERGÍA DE TORSIÓN

Cuando se analiza la muestra en su totalidad siguiendo este método, los resultados no son buenos, el poder de estimación de la edad al morir de la energía de torsión parece anecdótico.

La Figura 48 es idéntica a la Figura 47, la cual pinté en PowerPoint hacía años cuando intentaba explicar de qué trataba mi tesis a unos compañeros. Desde un principio era consciente de que los individuos de edad avanzada distorsionarían el modelo enormemente y así ha sido. La energía de torsión captura el suavizado de la superficie de la sínfisis del pubis al obliterarse las crestas y valles, pero, una vez la sínfisis es “plana”, nos encontramos con un parón en la capacidad de estimar la edad. Al reducir la edad a menos de 50 años podemos ver como individuos jóvenes presentan valores de energía de torsión

mayores y que estos decrecen con la edad. La asociación no es perfecta dado que estamos hablando de un proceso biológico y de muchos individuos, pero la señal que esperamos captar para el desarrollo de un método computacional capaz de estimar la edad al morir es recogida por los cambios en la energía de torsión en este estudio.

Ya se anunciaba en la introducción a este método que el cálculo de la energía de torsión que realiza Viewbox 4 es simplemente minimizar este parámetro entre la plantilla creada previamente y un individuo en el proceso de marcado de landmarks, este no es un cálculo “elegante” y se ha realizado simplemente para comprobar su poder para la estimación de la edad al morir y, en caso de un buen resultado como es este, para explorar opciones en la automatización del cálculo de este parámetro.

Como ha ocurrido en todos los métodos hasta ahora, con For Age, con la regresión sobre la *forma* del estudio morfométrico, con la matriz de co-ocurrencia y con la energía de torsión, lo que mejora los resultados es acotar la edad que pretendemos estimar. Esta decisión no es arbitraria, tiene sentido biológico dado que la maduración del pubis y, por tanto, el poder de su cara articular de estimar la edad (al menos, a nivel macroscópico), está descrito como limitado a este mismo rango de edad que hemos estado corroborando con cada método (Meindl et al., 1985; Todd, 1920).

Capítulo 9

El filtro de paso de banda de energía de torsión

9.1 INTRODUCCIÓN AL FILTRO DE PASO DE BANDA DE ENERGÍA DE TORSIÓN

Este método fue aplicado por primera vez por Peter Currie (Currie, 2018) en su tesis doctoral para evaluar la forma de septo nasal. El concepto de Partial warp (traducido literalmente como transformación parcial, se seguirá usando el término en inglés) fue introducido en 1989 (F. L. Bookstein, 1989, 1997, 2018). Sin embargo, dado que las fórmulas utilizadas en este método son muy técnicas, es preferible introducir el concepto por analogía con el espectro de Fourier (Grafakos, 2008; Körner, 1989).

Cualquier señal periódica variable en el tiempo (por ejemplo, una nota de la canción de un pájaro) puede ser descompuesta en una suma infinita de funciones trigonométricas simples, múltiplos de senos y cosenos. La idea del filtro de paso de banda usada aquí es análoga al mismo concepto utilizado en el control de agudos y graves de un reproductor de música. Un filtro acústico de paso bajo (el utilizado en este estudio) elimina las frecuencias altas dejando solo las graves, como en la búsqueda de un submarino enemigo por el ruido de su motor; un filtro de paso alto hace lo contrario, elimina los componentes de baja frecuencia del sonido dejando solo los agudos, como los pitidos de un sistema mecánico fallando.

En morfometría, el equivalente a los senos y los cosenos del análisis de Fourier es la serie de deformaciones parciales (partial warsp) de una descomposición de placa delgada (TPS). El equivalente de la amplitud de la señal de una onda de sonido es la energía de torsión de una deformación codificada en las posiciones de los landmarks y semilandmarks. Para el análisis de sonidos, siempre hay un componente de energía cero; para deformaciones hay un componente de energía cero análogo, el componente uniforme o componente afín que altera la *forma* en las mismas proporciones en todas partes, sin ninguna torsión. El análisis de Fourier empieza con una frecuencia baja fundamental arbitraria mientras que en el análisis de partial waps, esta frecuencia baja no es arbitraria, es, en cambio, la torsión de mayor escala, de un extremo a otro de la forma. Esto corresponde a la energía de torsión específica más baja, definida como el primer partial warp, que se calcula como el primer valor propio distinto de cero de la matriz de energía de torsión (F. L. Bookstein, 1989, 1997,

2018; Windhager, Bookstein, Millesi, Wallner, & Schaefer, 2017). En el análisis de Fourier, se debe de detener el análisis con una frecuencia que sea la mitad de la tasa real de recolección de datos; en el análisis de partial warps hay un punto de parada análogo, la energía de torsión del componente de deformación de menor escala, que suele ser el espacio relativo del par de landmarks o semilandmarks más próximos en la plantilla.

Continuando con este ejemplo, podemos imaginar el equivalente de un filtro de paso de banda para landmarks que funciona del mismo modo que funciona para sonidos: los filtros de paso bajo que eliminan los componentes de alta energía de torsión, buscando patrones fundamentales. En morfometría, esta sería la restricción de un análisis a los cambios de formas a gran escala: gradientes de crecimiento o curvas a lo largo de uno o dos diámetros principales. Asimismo, los filtros de paso alto eliminan curvas a gran escala, en busca de pliegues, ranuras, puntos de inicio de tejidos, desajustes en articulaciones óseas y similares.

La decisión de aplicar el filtro de paso de banda debe de basarse en la experiencia del dominio a priori. En este caso, se sabe que las deformaciones asociadas con el envejecimiento de la superficie de la sínfisis implican la obliteración de las ranuras típicas del individuo joven y el aplanamiento general de la forma de la superficie de la sínfisis a lo largo de las décadas. Esto sugiere estudiar los componentes a gran escala de la forma de la superficie aplicando un filtro de paso bajo.

9.2 REQUISITO PREVIO: ESTIMACIÓN POR TODD

La misma muestra en 3D fue clasificada según el método de Todd (Todd, 1920) por un experto independiente en antropología física; los rangos que el método de Suchey y Brooks (Brooks & Suchey, 1990) reporta son, en ocasiones, demasiado amplios para un caso de interés forense, es por esto que el método de Todd está aún en uso. El experto tenía permitido mover 360° los escaneos en 3D completamente anonimizados y sin ningún límite de tiempo utilizando el

visualizador de Artec Studio 11 en vista ortográfica. Cuando las dos hemicaras diferían en qué fase estaban y siguiendo las recomendaciones de la literatura (Kotěrová et al., 2019) la mayor de las dos fue asignada. El experto consideró que utilizar modelos en 3D en lugar del hueso fue apropiado excepto para comprobar la porosidad senil, dado que no es fácil de ver en los modelos tridimensionales. Los especímenes en los que había duda debido a esta porosidad no fueron incluidos en la muestra.

9.3 RESULTADOS DEL FILTRO DE PASO DE BANDA DE ENERGÍA DE TORSIÓN

Los 233 individuos varones fueron clasificados según el método de Todd mostrando que las tres primeras fases de Todd contenían a la mayoría de los individuos jóvenes (Figura 50). Ningún espécimen fue asignado a las fases IV y V a pesar de que hubiera individuos en ese rango de edad. Para las fases de la VI a la X, la varianza de los grupos de edad crece cada vez más, indicando una menor precisión en la estimación (Figura 50). Las fases IX y X incluyen individuos de todo el rango de edad de la muestra. Cuando restringimos la muestra a sínfisis más jóvenes que 50 años, vemos de nuevo dos subgrupos de fases. El primer subgrupo corresponde a individuos jóvenes y el segundo subgrupo abarca todo el rango de edad de la submuestra.

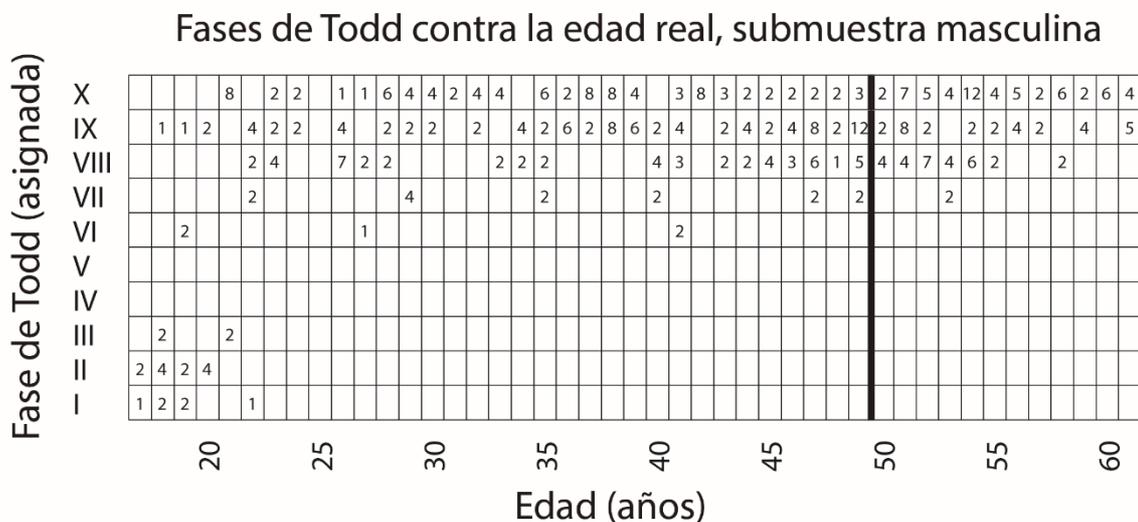


Figura 50. Fases de Todd asignadas por el experto contra la edad real. Ningún individuo fue asignado a las fases IV y V. Las tres primeras fases contienen a casi todos los individuos jóvenes mientras que las últimas fases (especialmente IX y X) contienen individuos de todo el rango edad presente en la muestra. La línea más oscura que corta la edad a los 50 años mantiene el problema de dos subgrupos, uno con los individuos más jóvenes y otro con el resto de la muestra.

Un primer paso en morfometría geométrica, obligatorio para el análisis de Procrustes, es restringir la muestra a un subrango de especímenes que cumplen las asunciones del método estadístico a aplicar. Como este estudio es un análisis exploratorio de una técnica multivariable, la muestra debe de ser restringida a un set acorde con las asunciones del kit de herramientas estadísticas que, en el caso de la morfometría geométrica, es que las *formas* siguen una distribución multivariable normal. Bajo este supuesto, la distancia de Procrustes al cuadrado entre los especímenes y la *forma* media siguen una distribución Mardia-Dryden, que es, aproximadamente una distribución chi-cuadrado (I. L. Dryden & Mardia, 2016). La Figura 51 muestra el histograma de las distancias de Procrustes al cuadrado para nuestra muestra. Claramente, la muestra al completo no cumple con esta suposición dado que no está distribuida como una chi-cuadrado. Además del conjunto de individuos cerca de la media, hay una dispersión de especímenes extremos que deben de ser considerados valores atípicos para un análisis exploratorio como este.

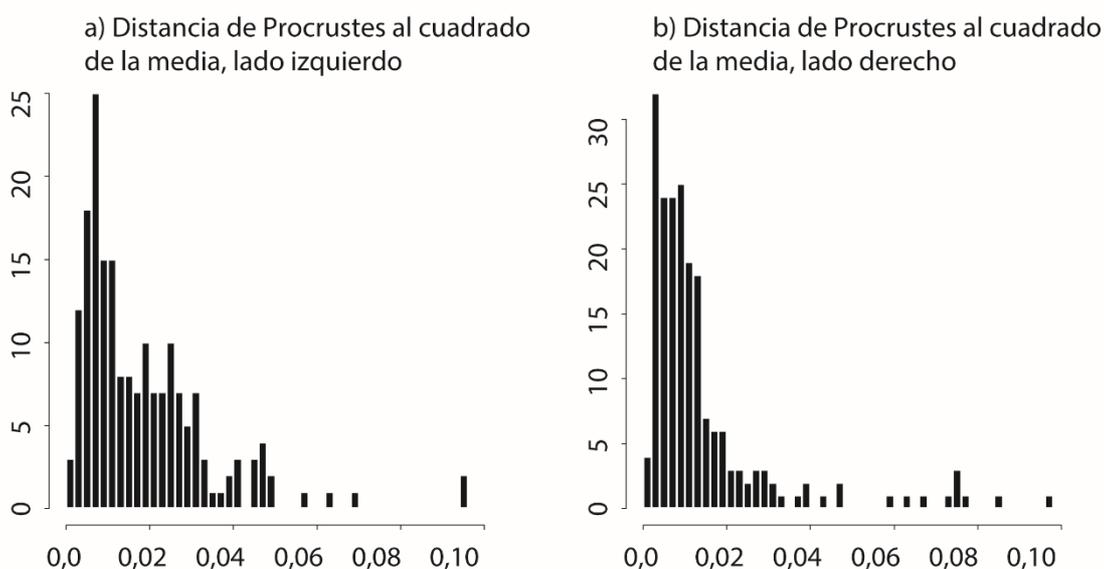


Figura 51. Histograma de las distancias de Procrustes sobre la media de las superficies articulares izquierda (a) y derecha (b). Los gráficos están truncados en $\rho^2 = 0,1$. Esto sugiere el umbral de $\rho^2 = 0,05$ utilizado en todos los análisis a partir de aquí.

Por lo tanto, cortamos ambas muestras (lado derecho e izquierdo) en el umbral de $\rho^2 = 0.05$, correspondiente al lado superior de la distribución de la superficie de la sínfisis izquierda, que es, en apariencia, más variable en su *forma* que el lado derecho. El tamaño de la muestra restante fue reducido desde 206 a 183 en el lado izquierdo y desde 215 a 188 en el lado derecho.

La Figura 52 indica que tan solo antes de los 50 años la energía de torsión decrece monótonamente con la edad. Esta asociación no está presente en individuos de mayor edad, lo cual sugiere que, para desarrollar un método de estimación de la edad al morir, la edad de los especímenes debe de ser truncada a los 49 años. Este rango corresponde al límite superior de la fase IX de Todd; este límite, como se verá en la discusión, es el más alto que puede considerarse por estimador de la edad significativo.

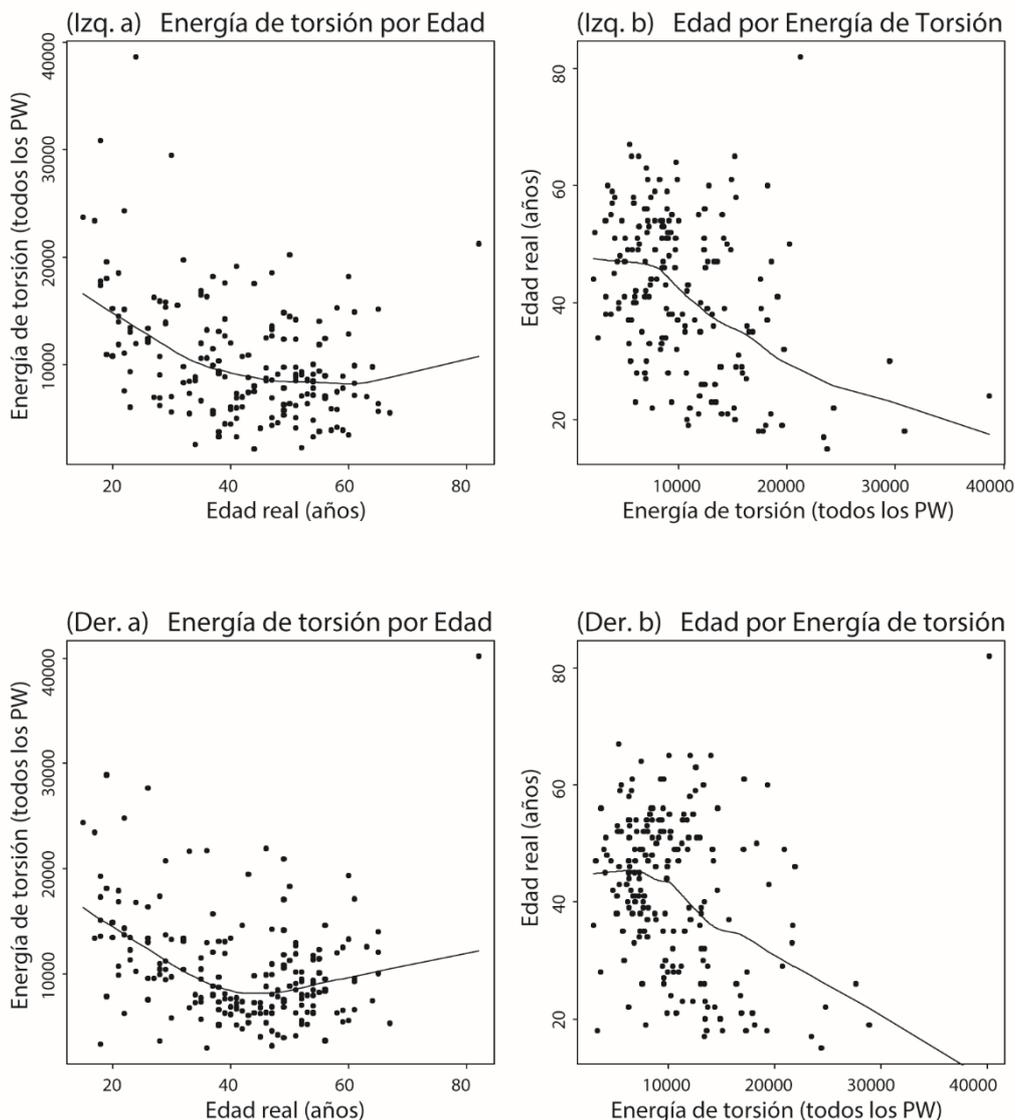


Figura 52. Energía de torsión total para la muestra de varones restringida a especímenes con distancia de Procrustes al cuadrado a la *forma* media de menos de 0,05 (como acordamos en la Figura 51). En la fila superior, sínfisis izquierdas, N = 183/206; fila inferior, sínfisis derechas, N = 188/215. Columna izquierda, energía de torsión total en el eje vertical, edad en el horizontal, con la energía de torsión contra la edad. Columna derecha, en análisis revertido, edad en el eje vertical en regresión sobre la energía de torsión a lo largo del eje horizontal. (Los análisis de la izquierda corresponden al proceso biológico, los de la derecha a la inferencia inversa en dirección contra causal). De nuevo podemos observar la predicción de la Figura 47 en la columna izquierda.

Basándonos en las muestras truncadas (edad por debajo de 50 y la distancia de Procrustes al cuadrado menor de 0,05 de la media), podemos

explorar todos los filtros de paso de banda posibles en la parte baja del espectro de energía de torsión. La Figura 53 muestra los mapas de contorno para las correlaciones del rendimiento del filtro con la edad real de la muestra. Claramente los mejores filtros comienzan con el primer componente distinto a cero de la energía de torsión, partial warp 1, y se detienen alrededor del partial warp 7. Por lo tanto, seleccionamos esta banda en particular para los análisis de los datos adicionales presentados en las Figuras 54 y 55.

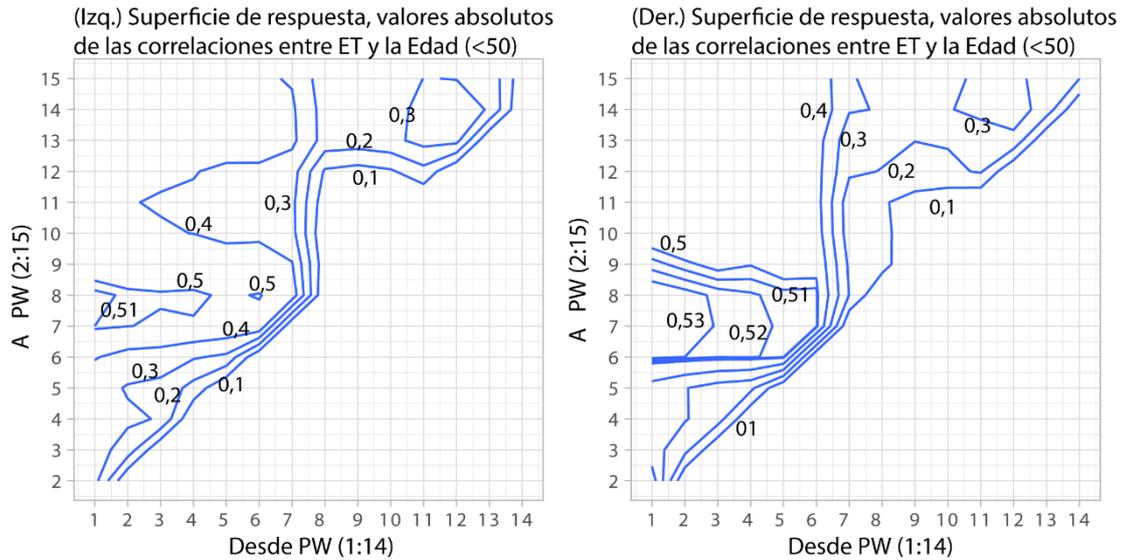


Figura 53. Análisis de filtro de paso de banda. Estos son los mapas de contorno con las correlaciones absolutas de los resultados del filtro de paso de banda y edad por las sínfisis izquierdas y derechas de menos de 50 años de edad, para todos los anchos de banda posibles entre los partial warps 1 y 15. Los tamaños de muestra son, lado izquierdo, $N = 121$; para el lado derecho, $N = 129$. Lado izquierdo, el contorno de correlación más alto es de 0,51. Para el lado derecho el contorno de correlación más alto es de 0,53. El filtro seleccionado para las Figuras 54 y 55, común para ambos lados, es la banda desde el partial warp 1 al partial warp 7.

Bajo estas dos restricciones, podemos hablar sobre la relación entre la energía de torsión de la sínfisis púbica y la edad del individuo, estos resultados están resumidos en las Figuras 54 y 55. El panel (a) de las figuras es una simple repetición de la Figura 53 para el paso de banda seleccionado. Aquí podemos observar la reducción de diez veces el rango del eje vertical, correspondiente a la eliminación de todos los partial warps de alta energía. Los niveles más bajos

aquí son consistentes con los de la figura anterior al indicar un cambio de tendencia importante cerca de los 50 años de edad. Por lo tanto, pasamos al panel (b), que restringe las edades al rango recomendado, resultando en submuestras de $N = 121$ para el lado izquierdo y $N = 129$ para el lado derecho. Las correlaciones de estas dispersiones, como pueden verse en sus títulos, ya son más altas que todo lo publicado en la literatura en métodos computacionales.

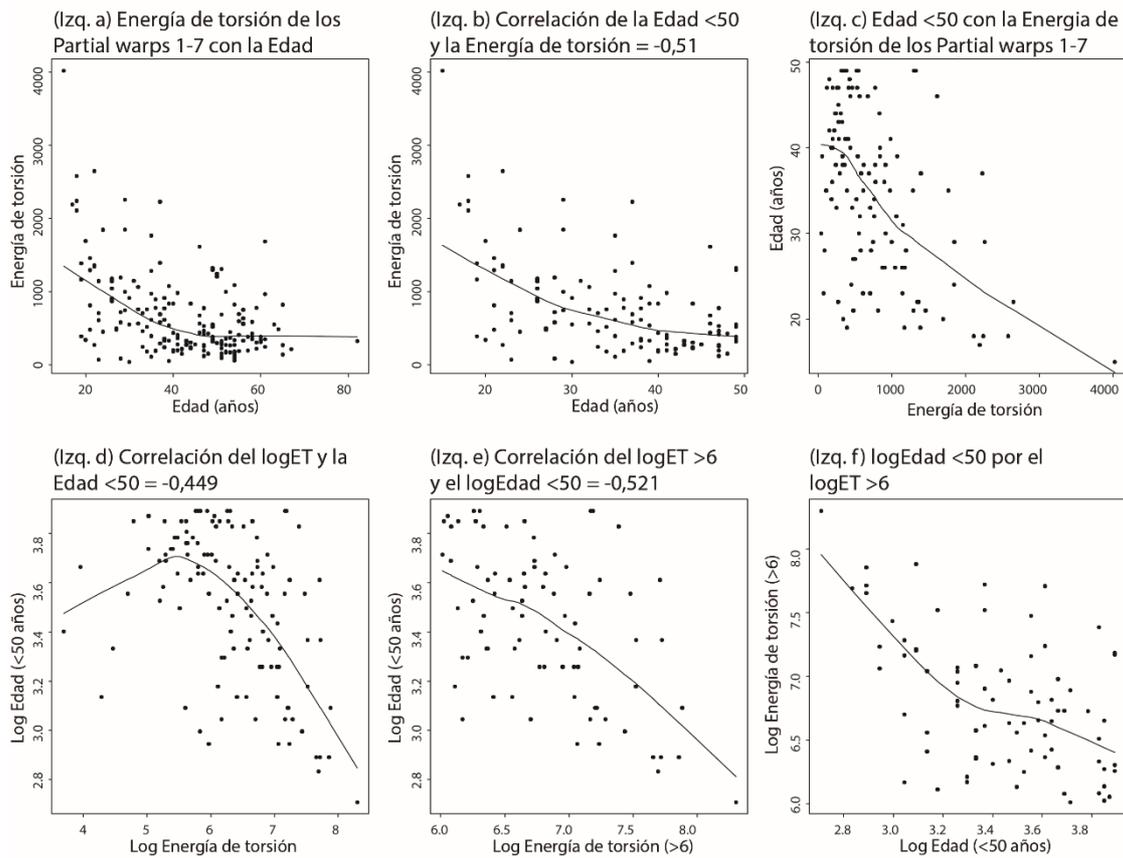


Figura 54. Elaboración del análisis de energía de torsión, la Figura 52, bajo la luz de los hallazgos de la Figura 53. Esta figura corresponde a la sínfisis izquierda. Panel (a), resultados en crudo del filtro (eje vertical) por la edad del espécimen (eje horizontal). Panel (b), restringido a edad bajo 50 años. Panel (c), reversión de las gráficas, resultados del filtro en el eje horizontal, edad (bajo 50 años) a lo largo del vertical. Panel (d), igual que el anterior, pero transformando ambos ejes en sus logaritmos. Panel (e), igual que el anterior, pero ahora restringido solo a los dominios de una tendencia biológica significativa (logaritmo del resultado del filtro mayor que 6). Panel (f), igual que el anterior, re-invertido para poner la variable dependiente de vuelta al eje vertical. Todas las curvas están suavizadas. Los logaritmos son en base e (logaritmos naturales).

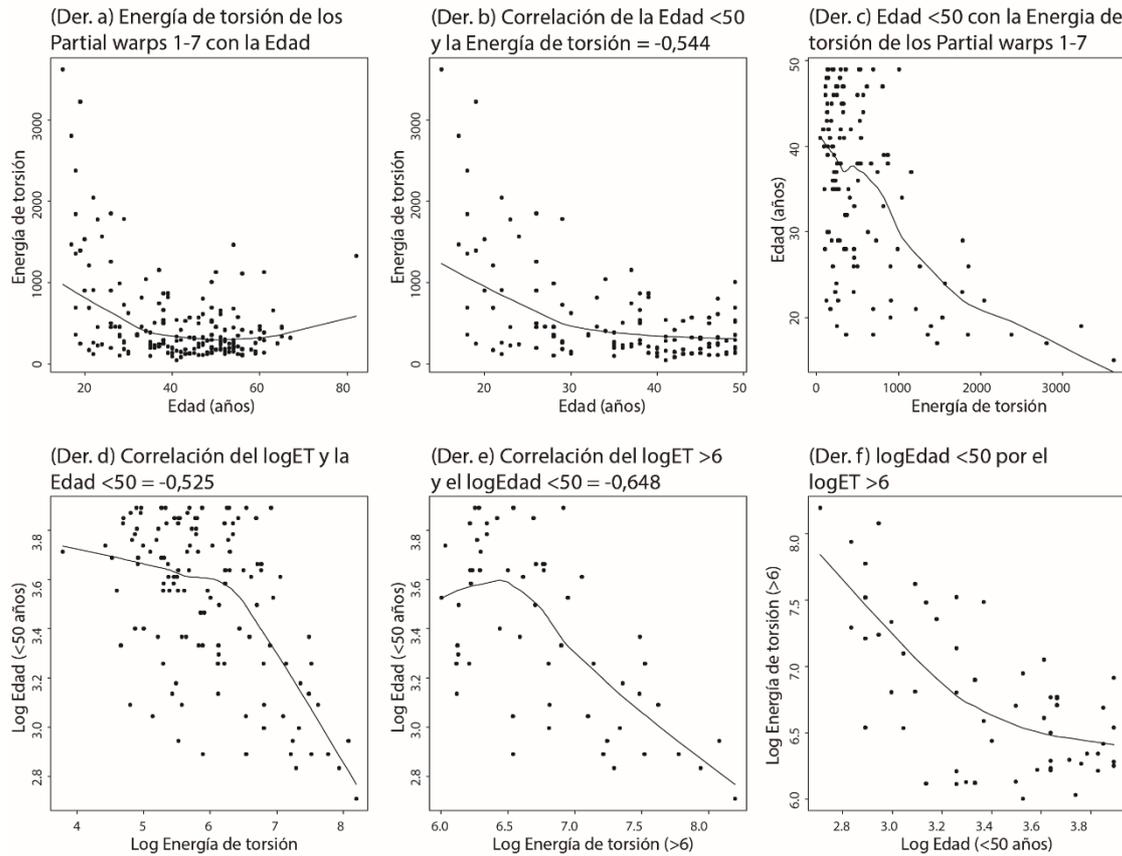


Figura 55. Elaboración del análisis de energía de torsión, la Figura 52, bajo la luz de los hallazgos de Fa figura 53. Esta figura corresponde a la sínfisis derecha. Panel (a), resultados en crudo del filtro (eje vertical) por la edad del espécimen (eje horizontal). Panel (b), restringido a edad bajo 50 años. Panel (c), reversión de las gráficas, resultados del filtro en el eje horizontal, edad (bajo 50 años) a lo largo del vertical. Panel (d), igual que el anterior, pero transformando ambos ejes en sus logaritmos. Panel (e), igual que el anterior, pero ahora restringido solo a los dominios de una tendencia biológica significativa (logaritmo del resultado del filtro mayor que 6). Panel (f), igual que el anterior, re-invertido para poner la variable dependiente de vuelta al eje vertical. Todas las curvas están suavizadas. Los logaritmos son en base e (logaritmos naturales).

La antropología forense se ocupa de estimar la edad a partir de la forma, no de predecir la forma a partir de la edad: se ocupa del problema de la estimación contra casual. Por lo tanto, modificamos las gráficas del panel (b) de las Figuras 54 y 55 intercambiando sus ejes, colocando la edad verticalmente en lugar de horizontalmente. El panel (c) en las mismas figuras muestra que una energía de torsión alta predice sin ambigüedad una edad baja, pero una energía

de torsión baja no parece predecir prácticamente nada. Frecuentemente, estas dificultades pueden solventarse o mejorarse reemplazando las variables por sus logaritmos. Los resultados después de la transformación logarítmica se muestran en los dos diagramas de dispersión en los paneles (d) de las Figuras 54 y 55, sugiriendo una resolución inmediata: restringir el dominio de aplicación de la técnica no solo a un rango de edad más bajo sino también a un rango de torsión más alto.

El panel (e) replica al panel (d) bajo la restricción de que el logaritmo natural de la energía de torsión es mayor que 6, implicando que la energía de torsión es mayor que e^6 , cerca de 400. Esto es un décimo del rango de la energía de torsión en el panel (a) y, por lo tanto, solo el 1% del rango original de la Figura 53. La curva inferior para la superficie de la sínfisis izquierda en el panel (e) es, ahora, adecuadamente lineal en todo su rango. La curva de la sínfisis derecha en el panel (e), aunque no es del todo lineal, muestra una correlación con la edad lo suficientemente grande como para recomendar el análisis en esta como una mejora metodológica. Para resaltar esta interpretación, volvemos a la disposición original de los ejes en el panel (a), con la causa biológica (el envejecimiento) a lo largo del eje horizontal y el efecto biológico (menor energía de torsión) a lo largo del eje vertical. Estos últimos análisis del panel (f) son muy superiores a los del panel (a) con los que comenzamos. El espacio en blanco en la esquina superior derecha de estos gráficos corresponde a los resultados que uno espera en un experimento controlado.

9.4 DISCUSIÓN: FILTRO DE PASO DE BANDA DE ENERGÍA DE TORSIÓN

Hemos enseñado que la estimación de la edad al morir basada en la sínfisis del pubis humano puede ser mejorada utilizando metodología de la morfometría geométrica y, en particular, al aplicar un filtro de paso de banda a los partial warps de la energía de torsión de las formas de la sínfisis. Nuestro último hallazgo, visible en la Figura 55, muestra que puede alcanzarse una correlación de -0,648 entre la edad y la energía de torsión. Esto mejora

sustancialmente lo que podemos extraer de los datos sin filtrar, como vimos en la Figura 52.

Estos resultados nos permiten revisar el trabajo pionero de Todd, hace cien años y su división en diez fases. Hemos podido confirmar la validez de las fases I a la III (las sínfisis jóvenes son fáciles de reconocer), pero nuestra metodología mejora las estimaciones de Todd en el resto del rango de edad (Figura 50) donde recordamos que las fases IV a la VII parecían irrelevantes.

Respecto al rango de edad medio, el panel (e) de las Figuras 54 y 55 muestra que la mayoría de los individuos que muestran un valor de energía de torsión bajo (después de la aplicación del filtro de paso bajo), están en el rango superior de nuestra variable truncada (la edad está cortada a los 49 años). De acuerdo con el panel (f), esta asociación es biológicamente significativa: para este rango, al incrementar la edad, la energía de torsión decrece.

Parte de este margen de mejora en la estimación reside en la idea original de Todd. Sus fases no son “estimaciones” reales de la edad. Como puede verse en la Figura 50, la edad media de las sínfisis en las fases de la VIII a la X son prácticamente la misma. Del mismo modo, las tres primeras fases tienen la misma edad media: no hay discriminación posible. Las fases de Todd estaban erróneamente basadas en una versión de la falacia de la “regresión sobre la media”. A pesar de que varias de las sínfisis de su muestra de personas entre los 40 y los 44 años se parecieran a una fase VIII no significa que esas sínfisis parecidas a la fase VIII deban de tener una edad promedio entre 40 y 44 años. En un análisis restringido por la eliminación de los individuos más jóvenes, la correlación entre las fases VIII, IX y X de Todd y la edad real es insignificante (0,0745). Por lo tanto, en análisis de Todd es más bien un detector de juventud y no una estimación de la edad.

En contraste, el análisis de los paneles (e) y (f) de las Figuras 54 y 55 es un hallazgo biométrico en este rango de edad específico. Ambos, la predicción de la edad dada la energía de torsión, panel (e), y, en la dirección opuesta, la predicción de la energía de torsión, panel (f), son válidos desde un punto de vista biométrico dentro de su rango de aplicabilidad. Podemos concluir que el problema forense en crudo, predicción de la edad al morir basada en la

aparición de la sínfisis púbica para todo el rango de edad humana, no admite una solución biométrica válida basándonos en estos datos. Cualquier método de “estimación” contra casual que surja de un cálculo multivariable lineal debe de ser restringido a priori dentro de los dominios en que los efectos que buscamos sean lineales vistos en la dirección causal apropiada.

Como ya se ha mencionado en repetidas ocasiones, la sínfisis del pubis deja de ser un indicador de la edad alrededor de los 50 años. Para muchos casos forenses, esto limita lo que se puede determinar a partir de material esquelético. La estimación de la edad al morir de los ancianos es, por lo tanto, un problema aun abierto que enfoques alternativos intentan resolver con experimentos computacionales (Baccino, Sinfield, Colomb, Baum, & Martrille, 2014; Dudzik & Langle, 2015).

Desde un principio restringimos en análisis a varones dado que en las mujeres podemos encontrar modificaciones en la sínfisis debidas a el embarazo y parto (Maass & Friedling, 2016; McArthur et al., 2016; Putschar, 1976; Sutro, 1936). Estas modificaciones podrían afectar a la señal de la edad de una manera que no podemos evaluar ya que no disponemos información respecto embarazos y nacimientos en estos esqueletos. No podemos, por lo tanto, especular cómo estas marcas afectarían a la energía de torsión.

La idea de predecir la edad al morir a partir de la sínfisis tiene más de un siglo. Aquí hemos mostrado un nuevo acercamiento al problema forense examinando los resultados de un filtro de paso de banda. En este estudio ejemplificamos la regla de oro de la biometría: antes de aplicar cualquier método multivariable lineal, es prioritario verificar que la muestra estudiada está mostrando un proceso biológico de progresión lineal. Entender el proceso debe de preceder cualquier modelado lineal. La teoría biológica previa debe de armonizar con la metodología estadística posterior. En este trabajo, el panel (f) de las Figuras 54 y 55 es coherente con esto: alcanzamos la linealidad con la aplicación del filtro de paso de banda y estableciendo un umbral para la señal superior; y cortando la escala de edad en la que probablemente ha cesado el proceso fisiológico de maduración, es decir, antes de los 50.

Capítulo 10

Discusión global

10.1 ESTIMAR LA EDAD AL MORIR

Como hemos visto, la estimación de la edad al morir libre de subjetividad y fases arbitrarias es posible, aunque no perfecta (Baccino et al., 2014; Dudzik & Langley, 2015; Slice & Algee-Hewitt, 2015; D. Stoyanova et al., 2015; D. K. Stoyanova et al., 2017). La morfometría geométrica se ha descubierto como una herramienta muy versátil capaz de arrojar luz al problema forense de la estimación de la edad a partir de restos esqueléticos. Puede que el problema aquí no sea forense sino estadístico: la solución debe de pasar por cambiar el problema.

Ninguna de las publicaciones que clasifican la sínfisis en fases permiten la predicción inversa fase en edad. De igual manera, ninguna de las publicaciones basadas en análisis morfométricos del efecto de la edad en la energía de torsión o derivados muestra la linealidad requerida para justificar la inversión del análisis (F. L. Bookstein, 2014; Cleveland, 1979; Fix, 1949; Weisberg, 2005). Esto nos enseña que el contexto biológico (desarrollo sutil y constante) es incompatible con el propósito de la predicción de la causa por el efecto. Solo truncando ambos, la causa (a edades inferiores a 50 años) y el efecto (a solo las sínfisis más “toscas” evaluadas en las siete escalas espaciales superiores) conseguimos algo similar a una regresión lineal útil (Pearson, 1903).

Esta es una lección desalentadora que debe de aplicarse a las ciencias forenses de manera más estricta. El problema forense original de la “estimación” de la edad de la muestra a partir de la morfología de la sínfisis púbica ha demostrado ser biológicamente incoherente. Esto es debido al caos producido por multitud de procesos independientes ocurriendo al mismo tiempo (y esto es en varones; tendríamos mayores complicaciones con las marcas que el embarazo y parto pudieran dejar en la sínfisis de las mujeres). Siempre que queramos apelar a correlaciones, varianza explicada por un factor o regresiones lineales (Rao, 1973), debemos de hacerlo siguiendo cierta coherencia biológica (F. L. Bookstein, 2015).

Merece la pena mirar a otros campos donde tienen que lidiar con la presencia de diversos procesos causales ocurriendo al mismo tiempo, como es

la psicología, concretamente, la psicometría (Stephenson, 1936). Cuando nos enfrentamos a un problema de estimación forense, que es reducido a un problema de maduración, la industria a imitar no es la biometría, sino los test de rendimiento; el escenario estadístico clásico para este tipo de análisis es Rasch (Rasch, 1993).

En la escala de Rasch, diferentes indicadores de maduración que no son lineales para la edad (normalmente tienen una asíntota superior y una inferior) y todos difieren en sus estadísticos descriptivos, pueden ser sumados por medio de sus probabilidades acumulativas separadas en una escala total de puntuación razonablemente lineal contra la edad real. Este tipo de modelo funciona muy bien en psicometría, un ejemplo son los exámenes de ortografía (típicos en países angloparlantes), donde cada ítem tiene su propio parámetro (su dificultad) y cada sujeto tiene su propio parámetro (su habilidad para resolverlo) lo cual reporta un resultado binario de aprobado/suspense: los ítems de menos dificultad que la habilidad del sujeto se puntúan como 1; aquellos ítems de dificultad superior a la habilidad del sujeto como 0. Este tipo de modelo puede simplificarse aún más con la escala de Guttman (Guttman, 1944).

El siguiente paso debería de ser probar el modelo de Rasch o Guttman en la estimación de la edad al morir de ancianos en lugar de seguir “mejorando” la regresión inversa. De hecho, Meindl et al. (Meindl et al., 1985) podría haber estado sugiriendo esto “a medida que la edad aumenta, la precisión de su evaluación se vuelve directamente proporcional al número de indicadores independientes a partir de los cuales juzgarla”. Se requeriría una lista de características postreproductivas de la sínfisis que aparezcan o desaparezcan en diferentes periodos de la edad total del individuo. Así, características como las labiaciones que Milner y Boldsen (Milner & Boldsen, 2012b) discuten en su artículo y que podrían ser un problema para la medida de la energía de torsión, podrían pasar a formar parte de esta lista durante un periodo concreto de edad.

Es muy probable que, con el origen de una lista de estas características postreproductivas, encontremos la conocida bifurcación de la función de la sínfisis: el contraste entre la sujeción del suelo pélvico (a consecuencia de la bipedestación) con la posibilidad en las hembras de ganar flexibilidad durante el parto y perderla tras el embarazo (Fischer & Mitteroecker, 2015; Grunstra et al.,

2019). Estas limitaciones funcionales no están sincronizadas, lo que hace plausible que dos “tipos” de sínfisis se vuelvan prominentes durante distintos periodos de edad.

Del mismo modo que entender cómo la evolución por selección natural es crucial para poder interpretar correctamente los cambios que han ocurrido en la pelvis humana, debemos de tener muy en cuenta el proceso biológico detrás de la maduración del pubis. ¿Son las diferencias en el pubis entre mujeres y hombres debidas, principalmente, al metabolismo del calcio?, ¿ha sido el retraso en la maduración del pubis seleccionado por la estrategia de reproducción humana?, ¿cómo afecta el consumo de alcohol y otras sustancias nocivas en la correcta maduración del pubis?, al reducir la presión selectiva que supone el tamaño del feto respecto al del canal del parto por medio de la medicina (cesáreas) ¿estaremos modificando, a la larga, la evolución de la pelvis?. Son preguntas que necesitan respuesta si queremos seguir mejorando la estimación del perfil biológico basándonos en exactamente eso, biología. Esta es la única manera de crear métodos que tengan en cuenta la vasta variabilidad humana y dejen de limitarse a solo una pequeña porción de esta y que introduzcan a la evolución por selección natural como la causa y no como un concepto teórico ajeno a los procesos de envejecimiento, maduración y diferenciación sexual.

Teniendo en cuenta los objetivos que se expusieron en el Capítulo 3, podemos concluir que los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser compilados en un paquete de software que cumpliría con todos los requisitos allí propuestos:

1. Ser independiente de la experiencia en antropología física y la subjetividad.
2. No está basado en fases arbitrarias; todos los métodos puntúan una sínfisis y correlacionan esta puntuación con una edad.
3. Potencialmente sencillo de utilizar debido a que todos los cálculos están automatizados.
4. El filtro de paso de banda de energía de torsión hasta los 50 años ha resultado ser la mejor estimación computacional de la edad al morir publicada hasta la fecha.

Como última idea, basados en la naturaleza caótica de los procesos degenerativos en la sínfisis del pubis tras los 50 años, podría ser de interés comprobar si la simetría entre ambas hemicaras decrece con la edad, asumiendo que estos cambios “aleatorios” ocurren de manera independiente en cada parte de la articulación, haciendo la asimetría mayor con el paso del tiempo (Figura 56).

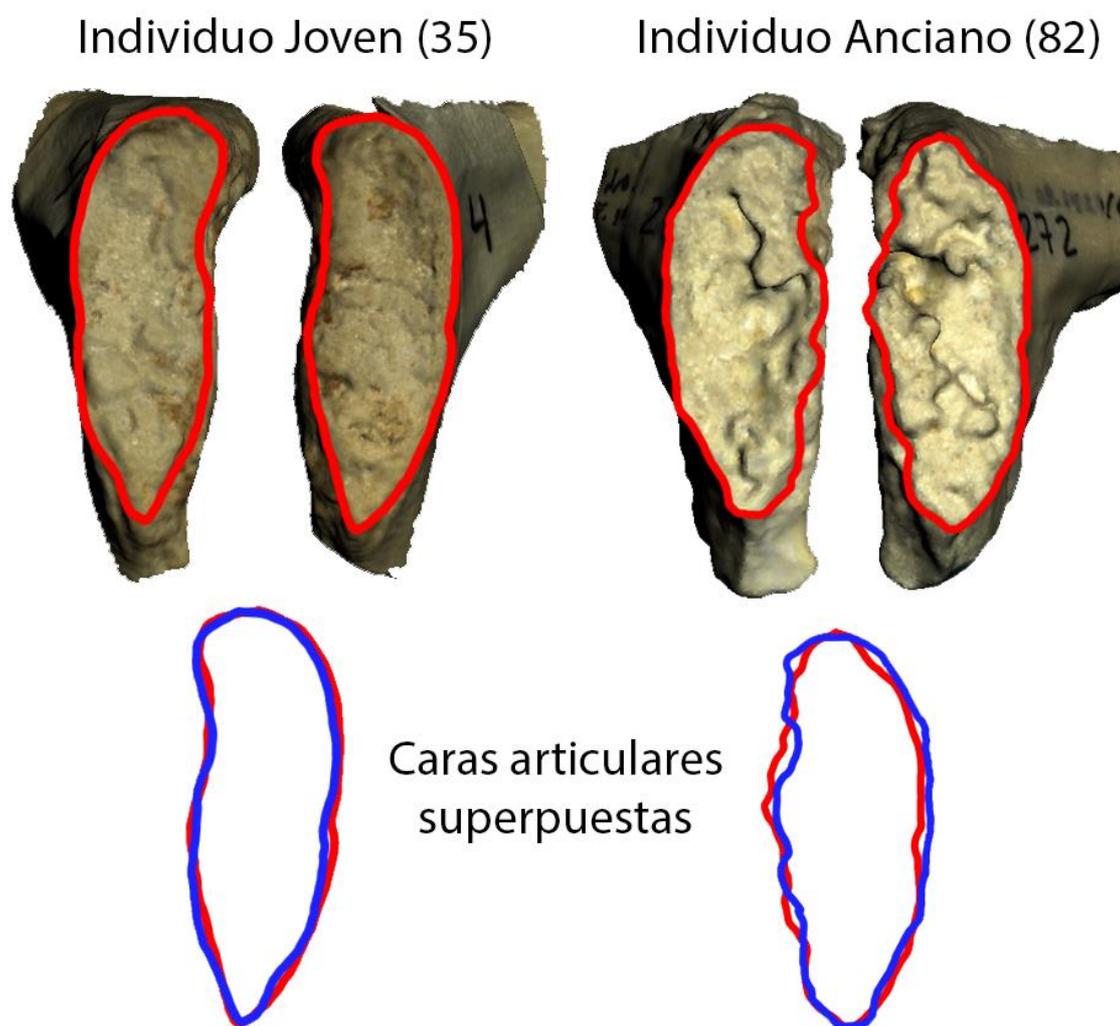


Figura 56. Diferencias en el contorno de la sínfisis púbica en dos individuos, uno de 35 años y el otro de 82. Resulta obvio a la vista que el individuo más mayor tiene menor simetría, esto es, sus caras articulares son más dispares entre sí.

Conclusiones

1. Se ha podido valorar la efectividad del software For Age en una muestra diferente con resultados muy similares a los obtenidos por los autores originales.
2. La morfometría geométrica ha demostrado ser una herramienta muy útil para estudiar la sínfisis del pubis a pesar de las limitaciones en el proceso de seleccionar landmarks.
3. El contorno de la sínfisis del pubis es dimórfico y cambia con el paso de la edad. Estas diferencias deben de ser tomadas en cuenta en cualquier intento de estimar la edad a partir de la sínfisis del pubis.
4. La divergencia morfológica del contorno de la sínfisis púbica entre mujeres y hombres empieza alrededor de los 30 años.
5. El poder de estimación de la edad al morir de la *forma* del contorno de la sínfisis púbica humana desaparece alrededor de los 50 años tanto para mujeres como para hombres.
6. Descriptores de la textura en una matriz de co-ocurrencia de escala de grises son capaces de capturar cambios debidos a la edad en la superficie articular del pubis.

7. La capacidad de la matriz de co-ocurrencia de escala de grises para estimar la edad está acotada superiormente a 35 años.
8. La energía de torsión puede utilizarse para la estimación de la edad al morir siempre y cuando acotemos la edad a 50 años.
9. Cuando filtramos la energía de torsión con un filtro de paso de banda, alcanzamos las mejores estimaciones de la edad publicadas hasta la fecha en un método de estimación computacional, si bien la edad está acotada hasta los 50 años.
10. La estimación de la edad al morir tiene aún camino por delante y, gracias a los avances en tecnología como la digitalización en 3D de la muestra, la antropología física se encuentra en una edad dorada.
11. Para mejorar la estimación de la edad al morir de individuos mayores de 50 años se proponen la utilización de la escala de Rasch y el cálculo de la asimetría entre ambas caras articulares del pubis.

1. The effectiveness of the For Age software has been assessed in a different sample with results very similar to those obtained by the original authors.
2. Geometric morphometrics has proven to be a very useful tool for studying the pubic symphysis despite the limitations in the process of landmarking.
3. The contour of the pubic symphysis is dimorphic and changes with age. These differences must be taken into account in any attempt to estimate age from the pubic symphysis.
4. The divergence in the morphology of the contour of the pubic symphysis between women and men begins around the age of 30.
5. The power of estimating age at death from the shape of the contour of the human pubic symphysis disappears around age 50 for both women and men.
6. Texture descriptors in a gray scale co-occurrence matrix are able to capture age-related changes from the surface of the articular face of the pubis.

7. The capacity of the gray scale co-occurrence matrix to estimate age is limited up to 35 years old
8. Bending energy can be used to estimate the age at death as long as we limit the age to 50 years old.
9. When we filter the bending energy with a bandpass filter, we reach the best estimates of the age at death published to date, although the age is limited to 50 years.
10. The estimation of the age at death still has a long way to go and, thanks to advances in technology such as the 3D digitization of the sample, physical anthropology is in a golden era.
11. In order to improve the age-at-death estimation of individuals over 50 years of age, I propose the use of the Rasch scale and the calculation of the asymmetry between both articular faces of the pubis.

Bibliografía

- Adams, D. C., Collyer, M., Kaliontzopoulou, A., & Sherratt, E. (2016). *Geomorph: Software for geometric morphometric analyses*.
- Adams, D. C., Rohlf, F. J., & Slice, D. E. (2004). Geometric morphometrics: Ten years of progress following the 'revolution'. *Italian Journal of Zoology*, *71*(1), 5-16.
- Adams, D. C., Rohlf, F. J., & Slice, D. E. (2013). A field comes of age: Geometric morphometrics in the 21st century. *Hystrix*, *24*(1), 7.
- Adams, R. A., & Thibault, K. M. (1999). Growth, development, and histology of the calcar in the little brown bat, *Myotis lucifugus* (Vespertilionidae). *Acta chiropterologica*, *1*(2), 215-221.
- Aeby, C. T. (1858). *Die Symphysis ossium pubis des Menschen: Nebst Beiträgen zur Lehre vom hyalinen Knorpel und seiner Verknöcherung. Mit 8 Kupfertafeln. Inauguraldissertation der hohen medicinischen Facultät zu Basel...* CF Winter.
- Algee-Hewitt, B. F. B. (2017). Appendix B: Age estimation in modern forensic anthropology. *Forensic anthropology: a comprehensive introduction*, 381-381.
- Arsuaga, J. L., & Carretero, J. M. (1994). Multivariate analysis of the sexual dimorphism of the hip bone in a modern human population and in early hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, *93*(2), 241-257.
- Baccino, E., Sinfield, L., Colomb, S., Baum, T. P., & Martrille, L. (2014). The two step procedure (TSP) for the determination of age at death of adult human remains in forensic cases. *Forensic science international*, *244*, 247-251.
- Bastir, M., García-Martínez, D., Torres-Tamayo, N., Palancar, C. A., Fernández-Pérez, F. J., Riesco-López, A., ... López-Gallo, P. (2019). Workflows in a Virtual Morphology Lab: 3D scanning, measuring, and printing. *Journal of Anthropological Sciences*, *97*, 1-28.
- Bastir, M., García-Martínez, D., Williams, S. A., Recheis, W., Torres-Sánchez, I., Río, F. G., ... Ogiyara, N. (2017). 3D geometric morphometrics of thorax variation and allometry in Hominoidea. *Journal of human evolution*, *113*, 10-23.

- Bastir, M., Rosas, A., & O'Higgins, P. (2006). Craniofacial levels and the morphological maturation of the human skull. *Journal of Anatomy*, 209(5), 637-654.
- Bates, K. T., Manning, P. L., Hodgetts, D., & Sellers, W. I. (2009). Estimating mass properties of dinosaurs using laser imaging and 3D computer modelling. *PLoS One*, 4(2), e4532.
- Becker, I., Woodley, S. J., & Stringer, M. D. (2010). The adult human pubic symphysis: A systematic review. *Journal of anatomy*, 217(5), 475-487.
- Boldsen, J. L., Milner, G. R., Konigsberg, L. W., Wood, J. W., Hoppa, R. D., & Vaupel, J. W. (2002). Transition analysis: A new method for estimating age from skeletons. En *Paleodemography: Age distributions from skeletal samples* (pp. 73-106). Cambridge University Press.
- Bookstein, F. (1991). *Morphometric tools for landmark data. Cambridge/New York/Port Chester.*
- Bookstein, F. L. (1986). Size and shape spaces for landmark data in two dimensions. *Statistical science*, 1(2), 181-222.
- Bookstein, F. L. (1989). Principal warps: Thin-plate splines and the decomposition of deformations. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 11(6), 567-585.
- Bookstein, F. L. (1997). *Morphometric tools for landmark data: Geometry and biology.* Cambridge University Press.
- Bookstein, F. L. (2014). *Measuring and reasoning: Numerical inference in the sciences.* Cambridge University Press.
- Bookstein, F. L. (2015). Integration, disintegration, and self-similarity: Characterizing the scales of shape variation in landmark data. *Evolutionary biology*, 42(4), 395-426.
- Bookstein, F. L. (2017). A newly noticed formula enforces fundamental limits on geometric morphometric analyses. *Evolutionary Biology*, 44(4), 522-541.

- Bookstein, F. L. (2018). *A course in morphometrics for biologists: Geometry and statistics for studies of organismal form*. Cambridge University Press.
- Bookstein, F. L., & Green, W. D. (1993). *Thin-plate spline for deformations with specified derivatives*. 2035, 14-28. International Society for Optics and Photonics.
- Brooks, S., & Suchey, J. M. (1990). Skeletal age determination based on the os pubis: A comparison of the Acsádi-Nemeskéri and Suchey-Brooks methods. *Human evolution*, 5(3), 227-238.
- Bruner, E., & Bastir, M. (2008). Digital morphology: Modelling anatomy and evolution. *Journal of anthropological sciences= Rivista di antropologia: JASS*, 86, 3-5.
- Chapman, A., Hall, L., & Bennett, M. (1994). Sexual dimorphism in the pelvic girdle of Australian flying foxes. *Australian journal of zoology*, 42(2), 261-265.
- Cleveland, W. S. (1979). Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American statistical association*, 74(368), 829-836.
- Cohen, D., Gonzalez, J., & Goldstein, I. (2016). The role of pelvic floor muscles in male sexual dysfunction and pelvic pain. *Sexual medicine reviews*, 4(1), 53-62.
- Conroy, G. C., Weber, G. W., Seidler, H., Tobias, P. V., Kane, A., & Brunson, B. (1998). Endocranial capacity in an early hominid cranium from Sterkfontein, South Africa. *Science*, 280(5370), 1730-1731.
- Crelin, E. (1969). Interpubic ligament: Elasticity in pregnant free-tailed bat. *Science*, 164(3875), 81-82.
- Crelin, E., & Newton, E. (1969). The pelvis of the free-tailed bat: Sexual dimorphism and pregnancy changes. *The Anatomical Record*, 164(3), 349-357.
- Cunningham, C., Scheuer, L., & Black, S. (2016). *Developmental juvenile osteology*. Academic press.

- Currie, P. (2018). *From geometric morphometrics to clinical classification: Using bending energy to assess the functional significance of nasoseptal deformity in a nonsurgical Austrian sample*. PhD Thesis), University of Vienna, Vienna.
- Darwin, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection, or, the preservation of favoured races in the struggle for life*. J. Murray.
- DeSilva, J. M., & Rosenberg, K. R. (2017). Anatomy, development, and function of the human pelvis. *The Anatomical Record*, 300(4), 628-632.
- Dixson, A., & Altmann, J. (2000). Primate sexuality: Comparative studies of the prosimians, monkeys, apes, and human beings. *Nature*, 403(6769), 481-481.
- Dryden, I. L., & Mardia, K. V. (2016). *Statistical shape analysis: With applications in R* (Vol. 995). John Wiley & Sons.
- Dryden, I., & Mardia, K. (1998). *Statistical analysis of shape*. Wiley.
- Dudzic, B., & Langley, N. R. (2015). Estimating age from the pubic symphysis: A new component-based system. *Forensic science international*, 257, 98-105.
- Eichkitz, C. G., Amtmann, J., & Schreilechner, M. G. (2013). Calculation of grey level co-occurrence matrix-based seismic attributes in three dimensions. *Computers & Geosciences*, 60, 176-183.
- Estévez, E. J., López-Lázaro, S., López-Morago, C., Alemán, I., & Botella, M. C. (2017). Sex estimation of infants through geometric morphometric analysis of the ilium. *International Journal of Legal Medicine*, 131(6), 1747-1756.
- Fajardo, R., & Müller, R. (2001). Three-dimensional analysis of nonhuman primate trabecular architecture using micro-computed tomography. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 115(4), 327-336.
- Fick, R. (1904). *Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke: T. Anatomie der Gelenke* (Vol. 1). G. Fischer.

- Fischer, B., & Mitteroecker, P. (2015). Covariation between human pelvis shape, stature, and head size alleviates the obstetric dilemma. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(18), 5655-5660.
- Fischer, B., & Mitteroecker, P. (2017). Allometry and sexual dimorphism in the human pelvis. *The Anatomical Record*, *300*(4), 698-705.
- Fix, E. (1949). *Distributions which lead to linear regressions*. 79, 91. University of California Press Berkeley, Calif.
- Friess, M. (2012). Scratching the surface? The use of surface scanning in physical and paleoanthropology. *Journal of Anthropological Sciences*, *90*, 1-25.
- Fuss, F. K., & Bacher, A. (1991). New aspects of the morphology and function of the human hip joint ligaments. *American journal of anatomy*, *192*(1), 1-13.
- García-Martínez, D., Bastir, M., Villa, C., García-Río, F., Torres-Sánchez, I., Recheis, W., ... Meyer, M. R. (2020). Late subadult ontogeny and adult aging of the human thorax reveals divergent growth trajectories between sexes. *Scientific reports*, *10*(1), 1-12.
- Garvin, H. M., & Passalacqua, N. V. (2012). Current practices by forensic anthropologists in adult skeletal age estimation. *Journal of Forensic Sciences*, *57*(2), 427-433.
- Gilbert, B. M., & McKern, T. W. (1973). A method for aging the female os pubis. *American Journal of Physical Anthropology*, *38*(1), 31-38.
- Good, P. (2013). *Permutation tests: A practical guide to resampling methods for testing hypotheses*. Springer Science & Business Media.
- Goodall, C. (1991). Procrustes methods in the statistical analysis of shape. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, *53*(2), 285-321.
- Gower, J. C. (1975). Generalized procrustes analysis. *Psychometrika*, *40*(1), 33-51.
- Grafakos, L. (2008). *Classical fourier analysis* (Vol. 2). Springer.

- Grunstra, N. D., Zachos, F. E., Herdina, A. N., Fischer, B., Pavličev, M., & Mitteroecker, P. (2019). Humans as inverted bats: A comparative approach to the obstetric conundrum. *American Journal of Human Biology*, 31(2), e23227.
- Gruss, L. T., Gruss, R., & Schmitt, D. (2017). Pelvic breadth and locomotor kinematics in human evolution. *The Anatomical Record*, 300(4), 739-751.
- Guidi, G., Russo, M., & Angheluddu, D. (2014). 3D survey and virtual reconstruction of archeological sites. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 1(2), 55-69.
- Gunz, P., & Mitteroecker, P. (2013). Semilandmarks: A method for quantifying curves and surfaces. *Hystrix, the Italian journal of mammalogy*, 24(1), 103-109.
- Gunz, P., Mitteroecker, P., & Bookstein, F. L. (2005). Semilandmarks in three dimensions. En *Modern morphometrics in physical anthropology* (pp. 73-98). Springer.
- Guttman, L. (1944). A basis for scaling qualitative data. *American sociological review*, 9(2), 139-150.
- Halazonetis, D. (2014). Viewbox 4-Cephalometric Software. *Greece: Dhal*.
- Haralick, R. M. (1979). Statistical and structural approaches to texture. *Proceedings of the IEEE*, 67(5), 786-804.
- Heyman, J. (1932). The symphysis pubis in pregnancy and parturition. *Acta Obstet Gynecol Scand*, 12, 191-26.
- Houle, D., Mezey, J., & Galpern, P. (2002). Interpretation of the results of common principal components analyses. *Evolution*, 56(3), 433-440.
- Huseynov, A., Zollikofer, C. P. E., Coudyzer, W., Gascho, D., Kellenberger, C., Hinzpeter, R., & de León, M. S. P. (2016). Developmental evidence for obstetric adaptation of the human female pelvis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(19), 5227-5232.

- Johanson, D. C., Lovejoy, C. O., Kimbel, W. H., White, T. D., Ward, S. C., Bush, M. E., ... Coppens, Y. (1982). Morphology of the Pliocene partial hominid skeleton (AL 288-1) from the Hadar formation, Ethiopia. *American Journal of Physical Anthropology*, 57(4), 403-451.
- Kemkes-Grottenthaler, A. (2002). Aging through the ages: Historical perspectives on age indicator methods. *CAMBRIDGE STUDIES IN BIOLOGICAL AND EVOLUTIONARY ANTHROPOLOGY*, 48-72.
- Kersten, T. P., Przybilla, H.-J., & Lindstaedt, M. (2016). Investigations of the geometrical accuracy of handheld 3D scanning systems. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2016(5-6), 271-283.
- Kim, J., Algee-Hewitt, B. F., Stoyanova, D. K., Figueroa-Soto, C., & Slice, D. E. (2019). Testing reliability of the computational age-At-death estimation methods between five observers using three-dimensional image data of the pubic symphysis. *Journal of forensic sciences*, 64(2), 507-518.
- Klingenberg, C. P. (2011). MorphoJ: an integrated software package for geometric morphometrics. *Molecular ecology resources*, 11(2), 353-357.
- Klingenberg, C. P. (2016). Size, shape, and form: Concepts of allometry in geometric morphometrics. *Development genes and evolution*, 226(3), 113-137.
- Klingenberg, C. P., & Monteiro, L. R. (2005). Distances and directions in multidimensional shape spaces: Implications for morphometric applications. *Systematic Biology*, 54(4), 678-688.
- Konigsberg, L. W., Herrmann, N. P., Wescott, D. J., & Kimmerle, E. H. (2008). Estimation and evidence in forensic anthropology: Age-at-death. *Journal of Forensic Sciences*, 53(3), 541-557.
- Körner, T. W. (1989). *Fourier analysis*. Cambridge university press.
- Kotěrová, A., Velemínská, J., Cunha, E., & Brůžek, J. (2019). A validation study of the Stoyanova et al. Method (2017) for age-at-death estimation quantifying the 3D pubic symphyseal

- surface of adult males of European populations. *International journal of legal medicine*, 133(2), 603-612.
- Kovacs, C. S. (2011). Calcium and bone metabolism disorders during pregnancy and lactation. *Endocrinology and Metabolism Clinics*, 40(4), 795-826.
- Kunz, T. H., & Kurta, A. (1987). *Size of bats at birth and maternal investment during pregnancy*. 57, 79-106.
- Kurki, H. K. (2011). Pelvic dimorphism in relation to body size and body size dimorphism in humans. *Journal of Human Evolution*, 61(6), 631-643.
- Lefebvre, A., & Corpetti, T. (2016). Monitoring the morphological transformation of Beijing old city using remote sensing texture analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(2), 539-548.
- Loeschcke, H. (1912). Untersuchungen über Entstehung und Bedeutung der Spaltbildungen in der Symphyse, sowie über physiologische Erweiterungsvorgänge am Becken Schwangerer und Gebärender. *Archiv für Gynäkologie*, 96(3), 525-560.
- Lottering, N., Reynolds, M. S., MacGregor, D. M., Meredith, M., & Gregory, L. S. (2014). Morphometric modelling of ageing in the human pubic symphysis: Sexual dimorphism in an Australian population. *Forensic science international*, 236, 195-e1.
- Lovejoy, C. O., Heiple, K. G., & Burstein, A. H. (1973). The gait of Australopithecus. *American Journal of Physical Anthropology*, 38(3), 757-779.
- Luschka, H. (1864). Die Anatomie des menschlichen Beckens. *Laupp and Siebeck, Tübingen*.
- Maass, P., & Friedling, L. J. (2016). Scars of parturition? Influences beyond parity. *International Journal of Osteoarchaeology*, 26(1), 121-131.
- Mallard, A. M., Savell, K. R. R., & Auerbach, B. M. (2017). Morphological integration of the human pelvis with respect to age and sex. *The Anatomical Record*, 300(4), 666-674.
- Marrón, B. S. (2012). Co-occurrence matrix and fractal dimension for image segmentation. *Revista de Matemática Teoría y Aplicaciones*, 19(1), 49-63.

- McArthur, T. A., Meyer, I., Jackson, B., Pitt, M. J., & Larrison, M. C. (2016). Parturition pit: The bony imprint of vaginal birth. *Skeletal radiology*, *45*(9), 1263-1267.
- McKern, T. W., & Stewart, T. D. (1957). *Skeletal age changes in young American males: Analysed from the standpoint of age identification* (Vol. 45). Headquarters, Quartermaster Research & Development Command.
- Meindl, R. S., Lovejoy, C. O., Mensforth, R. P., & Walker, R. A. (1985). A revised method of age determination using the os pubis, with a review and tests of accuracy of other current methods of pubic symphyseal aging. *American Journal of Physical Anthropology*, *68*(1), 29-45.
- Mikhail, E. M., Bethel, J. S., & McGlone, J. C. (2001). Introduction to modern photogrammetry. *New York*, 19.
- Milner, G. R., & Boldsen, J. L. (2012a). Skeletal age estimation: Where we are and where we should go. *A companion to forensic anthropology*, 224-238.
- Milner, G. R., & Boldsen, J. L. (2012b). Transition analysis: A validation study with known-age modern American skeletons. *American Journal of Physical Anthropology*, *148*(1), 98-110.
- Mitteroecker, P., Gunz, P., Bernhard, M., Schaefer, K., & Bookstein, F. L. (2004). Comparison of cranial ontogenetic trajectories among great apes and humans. *Journal of Human Evolution*, *46*(6), 679-698.
- Mitteroecker, P., Gunz, P., Windhager, S., & Schaefer, K. (2013). A brief review of shape, form, and allometry in geometric morphometrics, with applications to human facial morphology. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, *24*(1), 59-66.
- Monjok, E., Smesny, A., Essien, E. J., & Okokon, I. B. (2011). Rural Health and Family Medicine: An agenda for sub-Saharan Africa: Correspondence. *African Journal of Primary Health Care and Family Medicine*, *3*(1), 1-2.
- Neuweiler, G. (2000). *The biology of bats*. Oxford University Press on Demand.

- Niven, L., Steele, T. E., Finke, H., Gernat, T., & Hublin, J.-J. (2009). Virtual skeletons: Using a structured light scanner to create a 3D faunal comparative collection. *Journal of Archaeological Science*, 36(9), 2018-2023.
- Nwoha, P. U. (2000). Sex differences in the bony pelvis of the fruit-eating bat, *Eidolon helvum*. *Folia morphologica*, 59(4), 291-295.
- Ousley, S. (1995). Should we estimate biological or forensic stature? *Journal of Forensic Science*, 40(5), 768-773.
- Partio, M., Cramariuc, B., Gabbouj, M., & Visa, A. (2002). *Rock texture retrieval using gray level co-occurrence matrix*. 75. Citeseer.
- Pasquier, E., De Saint Martin Pernot, L., Burdin, V., Mounayer, C., Le Rest, C., Colin, D., ... Baccino, E. (1999). Determination of age at death: Assessment of an algorithm of age prediction using numerical three-dimensional CT data from pubic bones. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 108(3), 261-268.
- Pavličev, M., Romero, R., & Mitteroecker, P. (2020). Evolution of the human pelvis and obstructed labor: New explanations of an old obstetrical dilemma. *American journal of obstetrics and gynecology*, 222(1), 3-16.
- Pearson, K. (1903). On the inheritance of the mental and moral characters in man, and its comparison with the inheritance of the physical characters. *The Journal of the Anthropological Institute of Great Britain and Ireland*, 33, 179-237.
- Phillips, R., O'Higgins, P., Bookstein, F., Phillips, R., O'Higgins, P., & Bookstein, F. (2010). *EVAN (European Virtual Anthropology Network) toolbox*.
- Pinnell, S., & Crelin, E. (1963). *Fate of pubic bone aurotransplanted to tibia in estrogen-treated adult female mice*. 145(2), 345. WILEY-LISS DIV JOHN WILEY & SONS INC, 605 THIRD AVE, NEW YORK, NY 10158-0012.

- Pulido, C., Solaque, L., & Velasco, N. (2017). Weed recognition by SVM texture feature classification in outdoor vegetable crop images. *Ingeniería e Investigación*, 37(1), 68-74.
- Putschar, W. G. J. (1976). The structure of the human symphysis pubis with special consideration of parturition and its sequelae. *American Journal of Physical Anthropology*, 45(3), 589-594.
- Rao, C. R. (1973). *Linear statistical inference and its applications* (Vol. 2). Wiley New York.
- Rasch, G. (1993). *Probabilistic models for some intelligence and attainment tests*. ERIC.
- R-Core Team. (2017). R Foundation for Statistical Computing; Vienna, Austria: 2016. R: A language and environment for statistical computing. URL <http://www.R-project.org/>[Google Scholar].
- Reyment, R. A. (2010). Morphometrics: An historical essay. En *Morphometrics for nonmorphometricians* (pp. 9-24). Springer.
- Rohlf, F. J. (2015). The tps series of software. *Hystrix*, 26(1).
- Rohlf, F. J., & Corti, M. (2000). Use of two-block partial least-squares to study covariation in shape. *Systematic biology*, 49(4), 740-753.
- Rosse, C., & Gaddum-Rosse, P. (1997). *Hollinshead's textbook of anatomy* (Vol. 741). Lippincott Williams & Wilkins.
- Ruff, C. B., Burgess, M. L., Ketcham, R. A., & Kappelman, J. (2016). Limb bone structural proportions and locomotor behavior in AL 288-1 (« Lucy»). *PloS one*, 11(11), e0166095.
- Ruth, E. B. (1937). Metamorphosis of the pubic symphysis III. Histological changes in the symphysis of the pregnant Guinea pig. *The Anatomical Record*, 67(4), 409-421.
- Scheuer, L., & Black, S. (2004). *The juvenile skeleton*. Elsevier.
- Schlager, S. (2017). Morpho and Rvcg–Shape Analysis in R: R-Packages for geometric morphometrics, shape analysis and surface manipulations. En *Statistical shape and deformation analysis* (pp. 217-256). Elsevier.

- Schmidt, H. (1956). Die funktionelle Struktur der Symphyse im Erwachsenenalter. *Anat Anz*, 103, 135-152.
- Schultz, A. H. (1950). The physical distinctions of man. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 94(5), 428-449.
- Scientific Working Group for Forensic Anthropology (SWGANTH). (2013). *Age estimation*.
- Shi, H., Jia, J., Li, D., Wei, L., Shang, W., & Zheng, Z. (2018). Blood oxygen level-dependent magnetic resonance imaging for detecting pathological patterns in patients with lupus nephritis: A preliminary study using gray-level co-occurrence matrix analysis. *Journal of International Medical Research*, 46(1), 204-218.
- Slice, D. E. (2005). Modern morphometrics. En *Modern morphometrics in physical anthropology* (pp. 1-45). Springer.
- Slice, D. E. (2006). *Modern morphometrics in physical anthropology*. Springer Science & Business Media.
- Slice, D. E. (2007). Geometric morphometrics. *Annual Review of Anthropology*, 36.
- Slice, D. E., & Algee-Hewitt, B. F. B. (2015). Modeling bone surface morphology: A fully quantitative method for age-at-death estimation using the pubic symphysis. *Journal of forensic sciences*, 60(4), 835-843.
- Sokal, R., & Rohlf, F. (1998). *Biometry*.(4th printing).
- Solomon, R. W. (2009). Free and open source software for the manipulation of digital images. *American Journal of Roentgenology*, 192(6), W330-W334.
- Soto, C. F., Algee-Hewitt, B. F. B., Bravo Morante, G., Slice, D. E., & Steadman, D. W. (2018). Age-at-Death Estimation for Modern Populations in Mexico and Puerto Rico through the Use of 3D Laser Scans of the Pubic Symphysis. *Human Biology*, 90(3), 213-229.
- Spoor, F., Wood, B., & Zonneveld, F. (1994). Implications of early hominid labyrinthine morphology for evolution of human bipedal locomotion. *Nature*, 369(6482), 645-648.

- Steadman, D. W., Adams, B. J., & Konigsberg, L. W. (2006). Statistical basis for positive identification in forensic anthropology. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 131(1), 15-26.
- Stephenson, W. (1936). The foundations of psychometry: Four factor systems. *Psychometrika*, 1(3), 195-209.
- Stoyanova, D., Algee-Hewitt, B. F. B., & Slice, D. E. (2015). An enhanced computational method for age-at-death estimation based on the pubic symphysis using 3 D laser scans and thin plate splines. *American journal of physical anthropology*, 158(3), 431-440.
- Stoyanova, D. K., Algee-Hewitt, B. F. B., Kim, J., & Slice, D. E. (2017). A computational framework for age-at-death estimation from the skeleton: Surface and outline analysis of 3D laser scans of the adult pubic symphysis. *Journal of forensic sciences*, 62(6), 1434-1444.
- Stoyanova, D. K., Algee-Hewitt, B. F. B., Kim, J., & Slice, D. E. (2019). A study on the asymmetry of the human left and right pubic symphyseal surfaces using high-definition data capture and computational shape methods. *Journal of forensic sciences*, 64(2), 494-501.
- Sutro, C. J. (1936). The pubic bones and their symphysis. *Archives of Surgery*, 32(5), 823-841.
- Swartz, S. M., & Middleton, K. M. (2008). Biomechanics of the bat limb skeleton: Scaling, material properties and mechanics. *Cells Tissues Organs*, 187(1), 59-84.
- Tague, R. G. (1992). Sexual dimorphism in the human bony pelvis, with a consideration of the Neandertal pelvis from Kebara Cave, Israel. *American Journal of Physical Anthropology*, 88(1), 1-21.
- Testut, L. (1928). *Anatomie topographique*. Imp. A. Taffin-Lefort.
- Todd, T. W. (1920). Age changes in the pubic bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 3(3), 285-334.

- Todd, T. W. (1921). Age changes in the pubic bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 4(1), 1-70.
- Todd, T. W. (1923). The pubic symphysis of the guinea-pig in relation to pregnancy and parturition. *American journal of Anatomy*, 31(4), 345-357.
- Todd, T. W. (1930). Age changes in the pubic bone. VIII. Roentgenographic differentiation. *American journal of physical anthropology*, 14(2), 255-271.
- Toro Ibacache, M. V., Manriquez Soto, G., & Suazo Galdames, I. (2010). Morfometría geométrica y el estudio de las formas biológicas: De la morfología descriptiva a la morfología cuantitativa. *International Journal of Morphology*, 28(4), 977-990.
- Uyanık, G. K., & Güler, N. (2013). A study on multiple linear regression analysis. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 106, 234-240.
- Wallis, C. I., Brehm, G., Donoso, D. A., Fiedler, K., Homeier, J., Paulsch, D., ... Farwig, N. (2017). Remote sensing improves prediction of tropical montane species diversity but performance differs among taxa. *Ecological Indicators*, 83, 538-549.
- Walrath, D. E., & Glantz, M. M. (1996). Sexual dimorphism in the pelvic midplane and its relationship to Neandertal reproductive patterns. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 100(1), 89-100.
- Watney, P., & Rudd, B. (1974). Calcium metabolism in pregnancy and in the newborn. *BJOG: An International Journal of Obstetrics & Gynaecology*, 81(3), 210-219.
- Weber, E. (1830). *Handbuch der Anatomie des Menschen—Beschreibung des Knochensystems, des Muskelsystems under der Haut*.
- Weber, G. W. (2015). Virtual anthropology. *American journal of physical anthropology*, 156, 22-42.
- Weber, G. W., & Bookstein, F. L. (2011). *Virtual anthropology: A guide to a new interdisciplinary field*. Springer Verlag.

- Weber, G. W., Schäfer, K., Prossinger, H., Gunz, P., Mitteröcker, P., & Seidler, H. (2001). Virtual anthropology: The digital evolution in anthropological sciences. *Journal of physiological anthropology and Applied Human Science*, 20(2), 69-80.
- Weisberg, S. (2005). *Applied linear regression* (Vol. 528). John Wiley & Sons.
- White, T. D., & Folkens, P. A. (2005). *The human bone manual*. Elsevier.
- Windhager, S., Bookstein, F., Millesi, E., Wallner, B., & Schaefer, K. (2017). Patterns of correlation of facial shape with physiological measurements are more integrated than patterns of correlation with ratings. *Scientific Reports*, 7(1), 1-11.
- Wolfram Research, Inc. (s. f.). *Mathematica, Version 12.0*.
- Zayed, N., & Elnemr, H. A. (2015). Statistical analysis of haralick texture features to discriminate lung abnormalities. *International journal of biomedical imaging*, 2015.
- Zelditch, M. L., Swiderski, D. L., & Sheets, H. D. (2012). *Geometric morphometrics for biologists: A primer*. academic press.
- Zollikofer, C. P., de León, M. S. P., Martin, R. D., & Stucki, P. (1995). Neanderthal computer skulls. *Nature*, 375(6529), 283-285.



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**