



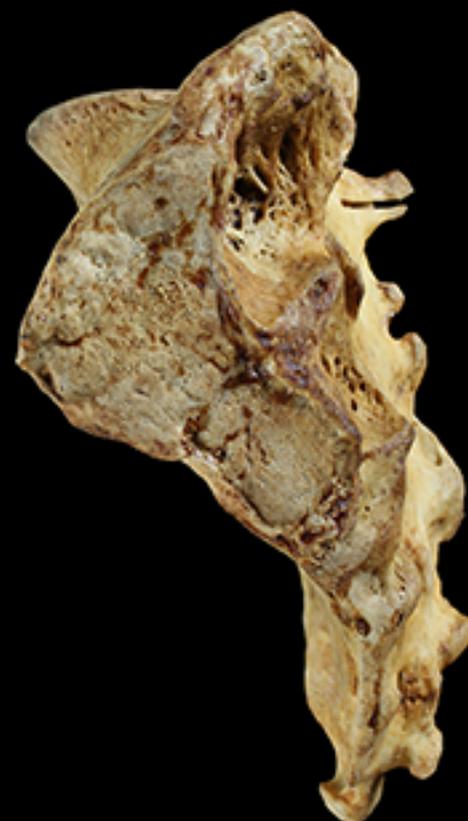
UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

Tesis  
Doctoral

## Estudio morfométrico del sacro.

Estimación del sexo y  
comparación de poblaciones actuales.

Estudio morfométrico del sacro.  
Estimación del sexo y comparación de poblaciones.



Benjamín  
Gaya  
Sancho

Benjamín Gaya Sancho  
Granada, 2019

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales  
Autor: Benjamín Gaya Sancho  
ISBN: 978-84-1306-331-7  
URI: <http://hdl.handle.net/10481/57420>



*UGR*

Universidad  
de **Granada**

TESIS DOCTORAL:

**Estudio morfométrico del sacro.  
Estimación del sexo y comparación de poblaciones  
actuales.**

Programa de Doctorado en Biomedicina

AUTOR: Benjamín Gaya Sancho

DIRECTORA:  
Dra. Inmaculada Alemán Aguilera

Granada, 2019



*Show must go on*

*-Queen*



## Agradecimientos

Nunca pensé que el día de poder ponerme a escribir esto llegaría y, sin embargo, aquí estoy, delante del ordenador tratando de organizar mis ideas y procurar no dejarme a nadie de agradecer el haber llegado hasta aquí.

Lo primero es dar las gracias a EMUCESA, por su tiempo y ayuda en la confección de la colección de referencia del cementerio de San José de Granada. También a las personas que participaron en su preparación. Además, incluir aquí también a las personas que han participado y me han ayudado en el proceso de preparación de la serie de Órgiva.

A Tracy y Lelia, y a todo el personal del *Department of Anthropology* de *University of Toronto* por haberme aguantado todas las dudas y mis caras terribles de no entender nada cuando me explicaban algo y, sobre todo, por haberme hecho sentir como en casa durante mi estancia.

Gracias a todas las personas que, de una forma u otra, han pasado por el laboratorio de Antropología y han ayudado a que esto siguiera adelante.

Gracias a Miguel por hacerme ver el apasionante mundo de la Antropología y transmitirme su pasión por él. Muchas gracias por adoptarme en el laboratorio y por animarme y escucharme siempre que lo he necesitado. A parte de los útiles y sabios consejos que me has dado. ¡Ah! Tampoco se me va a olvidar el “medir culos” ...

Gracias a Sylvia, Carmen y Rosa, por vuestras palabras de apoyo, vuestros consejos, vuestra disponibilidad para resolver todas mis dudas y por ayudar a hacer la estancia en el laboratorio mucho más llevadera.

Gracias a Margarita por ayudarnos a mantener un orden y ser el San Pedro del laboratorio abriendo y cerrando todas las puertas necesarias para llevar a cabo gran parte de esto... Por cierto, lo siento si a veces me he pasado de pesado pidiéndote cosas...

Gracias Javier Irurita por aguantar mis eternas dudas de “¿esto te gusta así?” “¿esto se entiende?” “Javier, esto no lo entiendo”. Agradecer también a Sandra y Joan por, cuando coincidíamos, tener siempre una frase de apoyo haciendo ver que hay luz al final del túnel.

A Inmaculada Alemán, mi directora de tesis. Gracias por todos tus consejos, por tu paciencia y por ayudarme cuando lo he necesitado (y más). Gracias por confiar en mí cuando propuse este trabajo y por guiarme durante este arduo proceso. Durante este tiempo he tenido la suerte de conocerte como profesional, pero sobre todo como persona, compañera, amiga y casi

segunda madre. Gracias por haber estado ahí en mis primeros pasos en el mundo de la Antropología Física.

Siguiendo el hilo de la facultad, creo que también procede agradecer a “los Pepes” por ser esa vía de escape cuándo ya no podíamos más y aguantarnos las cervezas de los viernes y los cafés con caras largas hasta el suelo.

A mi Bea, mi madre adoptiva de Granada, que en algunas ocasiones se ha preocupado más por mí que hasta yo mismo... Sobre todo, en el tema comida. ¡Ah! Además de ser una de las personas que más me ha aguantado y entendido durante todo este proceso. Además de ayudarme a ambientar el laboratorio al ritmo de las Spice Girls, obvio.

A Kike, mi churrita de Cai que me ha aguantado lo que nadie sabe. Aunque tú algo te lo has buscado cuando me metiste en el mundillo de la morfometría. Bueno, y cuando me has acogido en tu casa para disfrutar de los carnavales, y cuando me has sacado de tapas, y cuando me has escuchado rajando de la vida y del mundo entero...

A Paula. Esa hermana que encontré en el mundo sureño. Gracias por ser como eres, por escucharme, por entenderme, por centrarme cuando lo he necesitado, por saber siempre qué decir... No sé, podría llenar hojas con motivos que tengo para seguir diciéndote, en resumen, que GRACIAS por

estar en mi vida. PD1: más te vale seguir para siempre en mi vida. PD2: Antropocompis PD3: Zis.

A mi madre y a mi hermana, mis Vegas, que también han tenido que aguantar lo suyo y, pese a que no me entendierais cuando hablaba de la tesis, o llegarais a pensar que estoy loco, habéis conseguido centrarme y hacerme continuar. Gracias por ser ese apoyo incondicional, por valorarme y el esfuerzo que hacéis ayudándome para conseguir mis metas.

Finalmente, quiero agradecer a alguien extremadamente especial que nos dejó antes de tiempo. Sin él, seguramente nada de esto hubiera pasado. Aquí está la promesa que te hice, Papá, esto va por ti.

¡Muchas gracias a todos!



## Resumen

La estimación del sexo es uno de los pilares principales dentro del campo de la Antropología Física y Forense ya que nos aporta uno de los principales datos acerca del perfil biológico de un individuo.

En múltiples ocasiones no podemos acceder a las estructuras comúnmente utilizadas y por ello se hace necesario buscar nuevas metodologías complementarias en otras estructuras que nos permitan realizar buenas estimaciones de las características que conforman el perfil biológico.

El sacro, dentro de la población mediterránea, no ha sido una estructura especialmente estudiada y, pese a que su conservación es peor que el de otras estructuras, al formar parte de la cintura pélvica, se ha establecido como estructura potencialmente dimórfica.

En el presente trabajo, se llevaron a cabo diferentes análisis – incluyendo el análisis de regresión logística, la morfometría geométrica y el análisis de comparación de poblaciones- con el objetivo de poder cuantificar y corroborar el poder dimórfico del sacro.

La muestra final está compuesta por 541 individuos adultos procedentes de las colecciones osteológicas de San José, Órgiva (Granada) y Grant (Toronto).

Los resultados obtenidos muestran un aceptable poder dimórfico en el caso del análisis de regresión logística, con una fiabilidad de clasificación de 77.26 a 81.41%; en relación con el análisis de morfometría geométrica se obtuvo unas tendencias en la forma de la curvatura del sacro sin llegar a alcanzar el establecimiento de dicha variable como dimórfica. Finalmente, con relación a la comparación de poblaciones, se corroboró la usabilidad de las fórmulas de regresión, permitiendo identificar diferencias poblacionales incluso dentro de un mismo marco geográfico.

Por todo ello, se demostró el aceptable poder dimórfico del sacro y sus tendencias de forma mediante el análisis de regresión y de morfometría geométrica, arrojando nuevas metodologías complementarias en la estimación del sexo de individuos adultos.



## Abstract

Sex estimation is one of the pillars within Forensic and Physical Anthropology as it provides one of the main data of the biological profile of an individual.

Sometimes the most used structures cannot be used and therefore it is necessary to look for new complementary methodologies in other structures that allow us estimate correctly the characteristics included in that biological profile.

The sacrum, within Mediterranean population, has not been studied enough and, despite its conservation is worse than other structures, as it forms part of the pelvic girdle, it is a potential dimorphic structure.

In this study, we performed different analyses – including logistic regression, geometric morphometry and population comparison- in order to quantify and corroborate the dimorphic power of sacrum.

The final sample is composed of 541 individuals from the osteological collections of San José (Granada), Órgiva (Granada) and Grant (Toronto).

The obtained results show an acceptable dimorphic power for the logistic regression analysis with a correct assignment from 77,26% to 81,41%; for the morphometric analysis we obtained trends for the sacral curvature without determining the variable as a dimorphic one. Finally, the population comparison shows the usability for the regression formulas identifying differences among populations with the same geographical framework.

Therefore, the acceptable dimorphic power of the sacrum and its trends of form were demonstrated through regression analysis and geometric morphometric analysis providing new complementary methodologies in sex estimation of adult individuals.



## Índice.

|          |      |
|----------|------|
| Resumen  | xvii |
| Abstract | xxi  |

---

### *1 Introducción*

|              |   |
|--------------|---|
| INTRODUCCIÓN | 3 |
|--------------|---|

---

### *2 El hueso sacro: Embriología y anatomía*

|  |    |
|--|----|
| 2.1. Embriología del sacro.                            | 11 |
| 2.1.1. Periodo Blastemal: Notocorda.                   | 11 |
| 2.1.2. Periodo de osificación.                         | 13 |
| 2.1.2.1. Centros Primarios                             | 13 |
| 2.1.2.2. Centros secundarios                           |    |
| Epífisis.  | 14 |
| 2.1.2.3. Sacro   | 15 |
| 2.1.3. Características del sacro durante su formación. | 17 |
| 2.1.3.1. Curvatura                                     | 17 |
| 2.1.3.2. Variación en el número de vértebras           | 18 |
| 2.2. Anatomía del sacro.                               | 18 |
| 2.2.1. Términos útiles en anatomía sacra.              | 18 |
| 2.2.2. Descripción morfológica                         | 19 |
| 2.2.2.1. Cara anterior (Visión ventral)                | 20 |
| 2.2.2.2. Cara posterior (Visión dorsal)                | 22 |
| 2.2.2.3. Cara lateral (Visión lateral)                 | 23 |
| 2.2.2.4. Cara superior (Visión craneal)                | 25 |
| 2.2.2.5. Inserciones musculares                        | 26 |
| 2.2.3.6. Articulaciones: ligamentos y movimientos      | 27 |
| 2.2.3.6.1. Articulación sacroilíaca.                   | 27 |
| 2.2.3.6.1.1. Movimiento de nutación.                   | 29 |
| 2.2.3.6.2. Articulación sacrolumbar                    | 30 |
| 2.2.3.6.3. Articulación sacro-coccigea                 | 31 |

---

### *3 Estimación del sexo en Antropología Física*

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Aspectos generales en la estimación de sexo | 37 |
| 1.2. Métodos morfognósticos                      | 39 |
| 1.2.1. Pelvis                                    | 39 |
| 1.2.1.1. Otros caracteres morfológicos           | 44 |
| 1.2.1.2. Traumas por embarazo y post-parto       | 44 |
| 1.2.2. Cráneo                                    | 46 |
| 1.2.2.1 Norma frontal                            | 46 |
| 1.2.2.2. Norma sagital                           | 48 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 1.2.2.3. Norma posterior   | 50 |
| 1.2.2.4. Norma inferior    | 51 |
| 1.2.2.5. Mandíbula         | 51 |
| 1.3. Métodos morfométricos | 53 |

---

## 4 *Objetivos*

|           |    |
|-----------|----|
| OBJETIVOS | 61 |
|-----------|----|

---

## 5 *Material*

|   |    |
|---|----|
| 5.1. Contexto de las colecciones estudiadas.                                | 67 |
| 5.2. Colecciones que componen la muestra.                                   | 67 |
| 5.2.1. Colección del Cementerio Municipal de San José de Granada (Granada). | 67 |
| 5.2.2. Colección del Cementerio Municipal de Órgiva (Granada).              | 68 |
| 5.2.3. Colección Osteológica de Grant (Toronto).                            | 69 |

---

## 6 *Métodos*

|   |     |
|---|-----|
| 6.1. Factores Limitantes  | 75  |
| 6.2. Criterios de calidad para una metodología: Evaluación del error de las observaciones | 78  |
| 6.2.1. Error de Medición  | 79  |
| 6.2.1.1. Exactitud y Precisión.   | 80  |
| 6.2.1.2. Sensibilidad y Especificidad   | 82  |
| 6.2.1.3. Causas de variación en el error de medición.                                     | 84  |
| 6.2.2. Cálculo del error intra- e inter-observador.                                       | 84  |
| 6.3. Análisis de Regresión Logística Binaria.   | 87  |
| 6.3.1. Obtención de los datos   | 88  |
| 6.3.1.1. Definición de Variables  | 88  |
| 6.3.1.1.1. Variables Continuas  | 89  |
| 6.3.1.1.2. Variables discretas o numéricas discontinuas                                   | 89  |
| 6.3.1.1.3. Variables definidas en el sacro  | 90  |
| 6.3.2. Codificación de los datos  | 93  |
| 6.3.3. Tratamiento estadístico.   | 96  |
| 6.3.3.1. Composición y análisis descriptivo de la muestra.                                | 96  |
| 6.3.3.2. Análisis de reproducibilidad y de concordancia                                   | 97  |
| 6.3.3.3. Análisis de Normalidad y homocedasticidad  | 102 |
| 6.3.3.4. Análisis de regresión logística binaria  | 103 |
| 6.4. Análisis de la curvatura sacra mediante morfometría geométrica                       | 110 |
| 6.4.1. Antecedentes al estudio de la representación humana.                               | 110 |
| 6.4.2. Análisis de datos (Data acquisition)   | 115 |
| 6.4.2.1. <i>Landmarks</i> .   | 116 |
| 6.4.2.1.1 Características de los <i>landmarks</i>   | 116 |
| 6.4.2.1.2. Tipos de <i>Landmarks</i> (LM).  | 118 |
| 6.4.2.2. Toma de Fotografías  | 120 |

|  |     |
|--|-----|
| 6.4.2.3. Localización de <i>Landmarks</i>  | 122 |
| 6.4.2.4. Digitalización de datos   | 124 |
| 6.4.3. Tratamiento estadístico:  | 125 |
| 6.4.3.1. Análisis de error de observación.   | 125 |
| 6.4.3.1.1. Error intraobservador   | 131 |
| 6.4.3.1.2. Error interobservador   | 132 |
| 6.4.3.1.3. Análisis de la concordancia de las observaciones  | 132 |
| 6.4.3.2. Obtención de la forma.  | 133 |
| 6.4.3.2.1. Definición de forma.  | 134 |
| 6.4.3.2.2. Conceptos de Tamaño y Tamaño del Centroide  | 135 |
| 6.4.3.2.3. Espacios morfogeométricos   | 137 |
| 6.4.3.2.3.1. Espacio de las configuraciones.   | 137 |
| 6.4.3.2.3.2. Espacio preforma o pre-Kendalliano  | 138 |
| 6.4.3.2.3.3. Espacio de la forma   | 139 |
| 6.5.3.2.4. La superposición de procrustes  | 141 |
| 6.4.3.2.5. Deslizamiento de <i>semilandmarks</i> .   | 143 |
| 6.4.3.2.6. Visualización de los cambios: la función <i>Thin-Plate-Spline</i> (TPS).  | 146 |
| 6.4.3.2.6.1. Deformación Uniforme (Affine transformation) y No uniforme (Non-affine transformation).                           | 148 |
| 6.4.3.2.6.2. Principal warps, partial warps y relative warps.  | 150 |
| 6.4.3.3. Análisis de la variación y covariación de la <i>forma</i> mediante métodos de ordenación y estadística multivariante. | 152 |
| 6.4.3.3.1. Métodos de Ordenación   | 153 |
| 6.4.3.3.1.1. Análisis de Componentes Principales (PCA).  | 153 |
| 6.4.3.3.1.2. Análisis de Variables Canónicas (CVA).  | 156 |
| 6.4.3.4. Estadística Multivariante: Análisis multivariado de la varianza (MANOVA) y análisis de permutación.                   | 158 |
| 6.4.4. La morfometría geométrica y la Antropología Forense.  | 160 |
| 6.5. Comparación poblacional: Estudio de dimorfismo sexual mediante la aplicación de fórmulas de regresión.                    | 162 |
| 6.5.1. Introducción a la validación  | 162 |
| 6.5.1.1. Requisitos de las muestras  | 165 |
| 6.5.1.2. Características del método utilizado para la creación del modelo  | 166 |
| 6.5.1.3. Consideraciones relacionadas a la validación de métodos.  | 166 |
| 6.5.1.4. Criterios para la elección del método y su validación   | 167 |
| 6.5.2. Composición final de la muestra   | 169 |
| 6.5.2.1 Serie del Cementerio de San José de Granada.   | 169 |
| 6.5.2.2. Serie del Cementerio de Órgiva de Granada.  | 170 |
| 6.5.2.3. Serie de la Colección Osteológica de Grant de Toronto.  | 170 |
| 6.5.3. Obtención de los datos  | 171 |
| 6.5.4. Codificación de los datos   | 171 |
| 6.5.5. Tratamiento estadístico.  | 172 |
| 6.5.5.1. Análisis descriptivo  | 172 |
| 6.5.5.2. Selección de las fórmulas de regresión  | 173 |
| 6.5.5.3. Comparación de poblaciones  | 173 |
| 6.5.5.4. Análisis del grado de dimorfismo sexual   | 174 |
| 6.5.5.5. Aplicación de las fórmulas de regresión   | 180 |

---

## 7 Resultados y Discusión

|   |     |
|---|-----|
| 7. 1. Análisis de regresión logística binaria | 185 |
| 7.1.1. Composición final de la muestra        | 185 |

|  |     |
|--|-----|
| 7.1.2. Análisis de reproducibilidad y Concordancia                                   | 185 |
| 7.1.2.1. Análisis del error intraobservador  | 185 |
| 7.1.2.2. Análisis de error interobservador   | 197 |
| 7.1.2.3. Análisis de Concordancia de las observaciones                               | 209 |
| 7.1.3. Análisis descriptivo  | 213 |
| 7.1.4. Análisis de Normalidad y homocedasticidad                                     | 213 |
| 7.1.5. Análisis de dimorfismo sexual   | 214 |
| 7.1.5.1 Análisis de Regresión Logística Binaria                                      | 215 |
| 7.2. Análisis de la curvatura sacra mediante morfometría geométrica                  | 225 |
| 7.2.1. Composición final de la muestra   | 225 |
| 7.2.2. Análisis de reproducibilidad y concordancia                                   | 225 |
| 7.2.3. Métodos para el deslizamiento de <i>semilandmarks</i>                         | 229 |
| 7.2.4. Análisis del dimorfismo sexual  | 230 |
| 7.2.4.1. Análisis de Componentes Principales   | 230 |
| 7.2.4.2. Análisis de Variables Canónicas   | 233 |
| 7.2.4.3. Análisis de Funciones Discriminantes  | 233 |
| 7.3. Validación de las fórmulas de regresión logística y comparación de poblaciones. | 239 |
| 7.3.1. Composición final de la muestra   | 239 |
| 7.3.2. Análisis descriptivo  | 239 |
| 7.3.3. Selección de fórmulas de regresión  | 243 |
| 7.3.4. Comparación de poblaciones  | 257 |
| 7.3.4.1. Análisis de dimorfismo entre poblaciones                                    | 257 |
| 7.3.4.2. Análisis del grado de dimorfismo sexual entre poblaciones                   | 263 |
| 7.3.4.3. Aplicación de las fórmulas de regresión                                     | 265 |

---

## 8 Conclusiones

|              |     |
|--------------|-----|
| CONCLUSIONES | 275 |
|--------------|-----|

---

## 9 Bibliografía

|              |     |
|--------------|-----|
| BIBLIOGRAFÍA | 287 |
|--------------|-----|



## Índice de tablas

|  |          |
|--|----------|
| Tabla 3.1. Características dimórficas de la pelvis.  | 45       |
| Tabla 3.2. Características craneales de norma frontal  | 47       |
| Tabla 3.3. Características craneales de norma lateral  | 48       |
| Tabla 3.4. Características craneales de norma posterior  | 50       |
| Tabla 3.5. Características craneales de norma inferior   | 51       |
| Tabla 3.6. Características mandibulares  | 52       |
|  |          |
| Tabla 6.1. Codificación de las medidas   | 94       |
|  |          |
| Tabla 7.1. Resultados del grado de concordancia según el valor de coeficiente de correlación de concordancia de Linn   | 210, 211 |
| Tabla 7.2. Análisis descriptivo de las variables y t-test.   | 214, 215 |
| Tabla 7.3. Ecuaciones de regresión logística en análisis univariado  | 215, 216 |
| Tabla 7.4. Ecuaciones de regresión logística en análisis multivariado por método: Adelante (LR)  | 216      |
| Tabla 7.5. Porcentajes de clasificación correcta para las ecuaciones de regresión en el análisis univariado.   | 219      |
| Tabla 7.6. Porcentajes de clasificación para las ecuaciones de regresión logística en el análisis multivariado por el método: Adelante (Razón de Verosimilitud).   | 220      |
| Tabla 7.7. Análisis del error de observación mediante el coeficiente de correlación intraclase tras la tipificación de los valores originales. Valor de concordancia en la localización de <i>landmarks</i> y <i>semilandmarks</i> en sacro, un observador.    | 226      |
| Tabla 7.8. Análisis del error de observación mediante el coeficiente de correlación intraclase tras la tipificación de los valores originales. Valor de concordancia en la localización de <i>landmarks</i> y <i>semilandmarks</i> en sacro, dos observadores. | 227      |
| Tabla 7.9. Resultados del análisis discriminante de variables canónicas y validación cruzada para la <i>forma</i> .  | 235      |
| Tabla 7.10. Resultados del análisis discriminante de variables canónicas y validación cruzada basado en la forma y el tamaño.  | 236      |
| Tabla 7.11. Estadística descriptiva de la muestra final  | 240      |
| Tabla 7.12. Análisis descriptivo de la muestral final en base al sexo.   | 241      |
| Tabla 7.13. Análisis descriptivo según colecciones.  | 244      |
| Tabla 7.14. Análisis descriptivo de la variable ANF según colecciones y sexo.  | 246      |
| Tabla 7.15. Análisis descriptivo de la variable CTS según colecciones y sexo.  | 247      |
| Tabla 7.16. Análisis descriptivo de la variable CTMS según colecciones y sexo.   | 248      |
| Tabla 7.17. Análisis descriptivo de la variable CTMI según colecciones y sexo.   | 249      |
| Tabla 7.18. Análisis descriptivo de la variable CTI según colecciones y sexo.  | 250      |
| Tabla 7.19. Análisis descriptivo de la variable CLI según colecciones y sexo.  | 251      |
| Tabla 7.20. Análisis descriptivo de la variable CLD según colecciones y sexo.  | 252      |
| Tabla 7.21. Análisis descriptivo de la variable LM según colecciones y sexo.   | 253      |
| Tabla 7.22. Análisis descriptivo de la variable ACLI según colecciones y sexo.   | 254      |
| Tabla 7.23. Análisis descriptivo de la variable ACLD según colecciones y sexo.   | 255      |
| Tabla 7.24. Fórmulas de regresión logística seleccionadas para el análisis de comparación de poblaciones y validación del método de Gaya-Sancho et al. (2018)  | 256      |
| Tabla 7.25. Dimorfismo sexual para cada una de las series.   | 258      |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 7.26. Comparación de medias  | 261 |
| Tabla 7.27. Resultados del análisis de dimorfismo sexual según Relethford. | 263 |
| Tabla 7.28. Valores predictivos positivos para la serie de Órgiva.         | 266 |
| Tabla 7.29. Valores predictivos positivos para la serie de Grant.          | 267 |



## Índice de Figuras

|  |     |
|--|-----|
| Figura 2.1. Neurulación.   | 12  |
| Figura 2.2. Corte transversal a la altura del abdomen. 8ª semana.  | 13  |
| Figura 2.3. Visión ventral del Hueso Sacro.  | 21  |
| Figura 2.4. Visión dorsal del Hueso Sacro.   | 23  |
| Figura 2.5. Visión lateral del Hueso Sacro.  | 24  |
| Figura 2.6. Visión craneal del Hueso Sacro.  | 25  |
| Figuras 2.7. y 2.8. Complejo ligamentario de la pelvis.  | 28  |
| Figura 2.9. Movimiento de nutación de la articulación sacroilíaca  | 30  |
|  |     |
| Figura 3.1. Gráfico de variación sexual con solapamiento.  | 37  |
| Figura 3.2. Esquema de escotadura ciática  | 41  |
| Figura 3.3. Ángulo subpúbico   | 41  |
| Figura 3.4. Arco ventral   | 42  |
| Figura 3.5. Concavidad subpúbica   | 43  |
| Figura 3.6. Rama isquiopúbica  | 43  |
| Figura 3.7. Norma frontal  | 48  |
| Figura 3.8. Norma lateral  | 50  |
|  |     |
| Figura 6.1. Representación gráfica esquemática de los conceptos de exactitud y precisión.  | 82  |
| Figura 6.2. Representación gráfica de las medidas en el sacro  | 96  |
| Figura 6.3. Ejemplo hipotético de línea de concordancia  | 99  |
| Figura 6.4. Interpretación de los valores del CCC en la correlación de dos variables cualitativas según McBride                              | 100 |
| Figura 6.5. Representación gráfica de una función logarítmica binaria  | 107 |
| Figura 6.6. Fotografía del sacro perteneciente al individuo G-520 de la colección de San José.   | 122 |
| Figura 6.7. Fotografía con la colocación de <i>landmarks</i> y <i>semilandmarks</i> dibujando la curva.                                      | 124 |
| Figura 6.8. Fórmulas para calcular el ICC.   | 130 |
| Figura 6.9. Método para estimar tamaño del centroide   | 135 |
| Figura 6.10. Representación gráfica de espacios.   | 139 |
| Figura 6.11. Proyección de un punto situado en el espacio de Kendall sobre el espacio tangente.  | 140 |
| Figura 6.12. Representación esquemática del proceso de Superposición de Procrustes   | 142 |
| Figura 6.13. Ejemplo de distintos métodos de deslizamiento de <i>semilandmarks</i> en esplanocráneo  | 145 |
| Figura 6.14. Visualización de los cambios en el análisis del dimorfismo sexual   | 148 |
| Figura 6.15. Seis transformaciones uniformes   | 149 |
| Figura 6.16. Grillas de deformación representando una transformación uniforme y no uniforme  | 150 |
|  |     |
| Figura 7.1. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANF, tomadas por el observador A   | 186 |
| Figura 7.2. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANSC, tomadas por el observador A. | 186 |
| Figura 7.3. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones PSC, tomadas por el observador A   | 187 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 7.4. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTS, tomadas por el observador A          | 187 |
| Figura 7.5. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTMS, tomadas por el observador A.        | 188 |
| Figura 7.6. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTMI, tomadas por el observador A.        | 188 |
| Figura 7.7. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTI, tomadas por el observador A.         | 189 |
| Figura 7.8. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CLI, tomadas por el observador A.         | 189 |
| Figura 7.9. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CLLI, tomadas por el observador A.        | 190 |
| Figura 7.10. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CLD, tomadas por el observador A.        | 190 |
| Figura 7.11. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CLLD, tomadas por el observador A        | 191 |
| Figura 7.12. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANM, tomadas por el observador A.        | 191 |
| Figura 7.13. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones LM, tomadas por el observador A.         | 192 |
| Figura 7.14. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CUA, tomadas por el observador A         | 192 |
| Figura 7.15. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANAI, tomadas por el observador A.       | 193 |
| Figura 7.16. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANAD, tomadas por el observador A        | 193 |
| Figura 7.17. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANH, tomadas por el observador A         | 194 |
| Figura 7.18. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACSI, tomadas por el observador A        | 194 |
| Figura 7.19. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANCSI, tomadas por el observador A.      | 195 |
| Figura 7.20. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACSD, tomadas por el observador A        | 195 |
| Figura 7.21. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANCSA, tomadas por el observador A.      | 196 |
| Figura 7.22. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACLI, tomadas por el observador A        | 196 |
| Figura 7.23. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACLD, tomadas por el observador A.       | 197 |
| Figura 7.24. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANF, tomadas por el ambos observadores   | 198 |
| Figura 7.25. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANSC, tomadas por el ambos observadores  | 198 |
| Figura 7.26. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones PSC, tomadas por el ambos observadores   | 199 |
| Figura 7.27. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTS, tomadas por el ambos observadores.  | 199 |
| Figura 7.28. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTMS, tomadas por el ambos observadores. | 200 |
| Figura 7.29. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTMI, tomadas por el ambos observadores  | 200 |
| Figura 7.30. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTI, tomadas por el ambos observadores.  | 201 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 7.31. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CLI, tomadas por el ambos observadores    | 201 |
| Figura 7.32. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CCLI, tomadas por el ambos observadores   | 202 |
| Figura 7.33. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CLD, tomadas por el ambos observadores.   | 202 |
| Figura 7.34. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CCLD, tomadas por el ambos observadores   | 203 |
| Figura 7.35. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANM, tomadas por el ambos observadores.   | 203 |
| Figura 7.36. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones LM, tomadas por el ambos observadores     | 204 |
| Figura 7.37. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CUA, tomadas por el ambos observadores    | 204 |
| Figura 7.38. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANAI, tomadas por el ambos observadores.  | 205 |
| Figura 7.39. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANAD, tomadas por el ambos observadores   | 205 |
| Figura 7.40. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANH, tomadas por el ambos observadores    | 206 |
| Figura 7.41. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACSI, tomadas por el ambos observadores.  | 206 |
| Figura 7.42. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANCSI, tomadas por el ambos observadores. | 207 |
| Figura 7.43. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACS D, tomadas por el ambos observadores  | 207 |
| Figura 7.44. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANCS D, tomadas por el ambos observadores | 208 |
| Figura 7.45. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACLI, tomadas por el ambos observadores.  | 208 |
| Figura 7.46. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACLD, tomadas por el ambos observadores.  | 209 |
| Figura 7.47. Deslizamiento de <i>landmarks</i> según el método de minimización de energía de torsión.  | 230 |
| Figura 7.48. Gráfico de dispersión y grillas de deformación para el análisis de componentes principales.   | 232 |
| Figura 7.49. Gráfico de dispersión y grillas de deformación en el Análisis de Variables Canónicas.   | 234 |

## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN



La estimación del sexo dentro del campo de la antropología Física y Forense es una de las piezas fundamentales para el establecimiento del perfil biológico del individuo de estudio. Este parámetro, en múltiples ocasiones, termina siendo fundamental para poder realizar las estimaciones de otros como por ejemplo la estatura.

Considerando la evolución histórica de la Antropología Física y Forense se han ido desarrollando diversos y múltiples métodos de estimación de sexo, tanto en individuos adultos como en infantiles. Para ello se ha recurrido a gran cantidad de estructuras que encontramos en el individuo: desde el cráneo hasta el calcáneo, entre otros muchos.

El principal problema que se puede encontrar ante esto es la dificultad, en ciertos contextos, de acceso a determinados huesos o la conservación de los mismos. Por tanto, se hace necesaria la incorporación de nuevas estructuras, metodologías y tecnologías que nos ayuden a realizar una correcta estimación del sexo.

El hueso sacro es una estructura ósea que se ha presupuesto como dimórfica dada su localización dentro de la cintura pélvica, pero sin embargo, en líneas generales, no se ha llegado a estudiar en suficiente profundidad dentro de la población mediterránea.

A nivel morfológico y siguiendo la regla general establecida para la cintura pélvica, el sacro masculino es más largo y estrecho que el femenino, el cual es más corto y ancho. Además, se ha descrito que la curvatura interna en los hombres es más uniforme mientras que las mujeres tienen una curva más pronunciada a partir de los segmentos dos y tres.

Sin embargo, hasta la actualidad los estudios centrados en cuantificar el poder dimórfico del sacro, su forma y, por ende, su influencia dentro de la cintura pélvica han sido escasos. Por tanto, estas características basadas en la morfología del mismo se podrían considerar solo en los casos más extremos (Burns, 2015).

A nivel métrico, contamos principalmente con estudios como los de Fawcett (1970), Flander (1978) o Kimura (1982) en los cuales se utilizan las medidas descritas por Wilder (1920) junto con otros índices para poder valorar las proporciones del hueso en su conjunto. Estos estudios están realizados en poblaciones americanas y japonesas, por tanto, pueden orientar en la estimación del sexo para dichas poblaciones, pero no para una población como con la que se cuenta en este estudio, la mediterránea.

Por otro lado, en el campo de la morfometría geométrica destacan los trabajos realizados por Passalacqua (2010), Vollner (2011), Plochocki (2011) y Rusk (2016). En ellos se estudia tanto el tamaño como la curvatura sacra haciendo uso de *landmarks* tanto a nivel bidimensional como tridimensional. Sin embargo, volvemos a la problemática de que son estudios desarrollados, en su gran mayoría, con poblaciones americanas.

Por todo lo anterior, el presente trabajo incluye el desarrollo de nuevas metodologías que nos permiten obtener una mayor cantidad de información acerca del sexo del individuo basadas en el hueso sacro y en una población mediterránea.

Así, se considera oportuno incluir en los capítulos de introducción – capítulos 2 y 3- un recuerdo anatómico del hueso sacro y de las diferentes metodologías utilizadas para estimar el sexo dentro del campo de la Antropología Física y Forense.

El resto de los capítulos siguen la estructura de una tesis doctoral en formato tradicional incluyendo: Objetivos, Material, Métodos, Resultados, Discusión y Conclusiones. El capítulo 6 – Métodos- incluye también todo el componente teórico de las distintas metodologías utilizadas para el desarrollo de la tesis doctoral. Finalmente, los apartados de Resultados y Discusión se pueden encontrar unificados dentro del capítulo 7.



CAPITULO 2. EL HUESO SACRO: EMBRIOLOGÍA Y  
ANATOMÍA.



## 2.1. Embriología del sacro.

La embriogénesis o formación de la columna vertebral incluye la formación del sacro, compartiendo un origen común. Antes de llegar a las fases finales de formación donde encontramos el sacro como lo conocemos, hemos de conocer el proceso de formación y así poder entender mejor su estructura y morfología.

### 2.1.1. Periodo Blastemal: Notocorda.

La notocorda en su forma primitiva es el predecesor a la columna vertebral. Consiste en un conjunto de células colocadas centralmente en el embrión en los ejes dorso-ventral y lateral. Las células prenotocordales se invaginan en la región del nódulo y emigran en dirección cefálica alcanzando la placa precordial. Las células de dicha placa proliferan, se desprenden del endodermo y forman una especie de cordón más consistente, que es lo que se conoce como notocorda (Bruni, 1912; Linck, 1911; Williams, 1908).

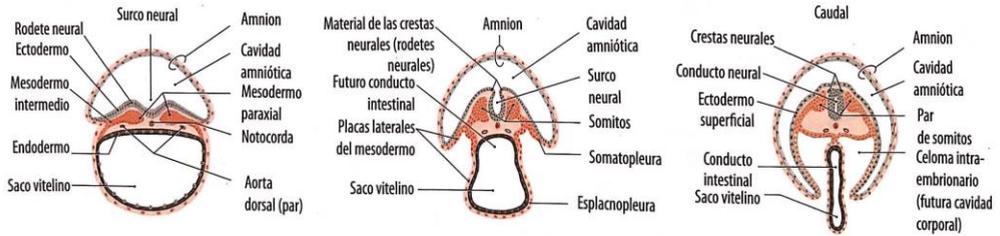


Figura 2.1. Neurulación. Cortes transversales esquemáticos correspondientes a las fases iniciales: desde los 19 a los 22 días. (tomado de Prometheus, 2010).

En el mesodermo, la capa intermedia de las tres que forman el embrión, se forman un conjunto de células llamadas somitos. Estos somitos, aproximadamente entre la tercera y cuarta semana, se dividen en: Dermatomo (que formará la dermis y subdermis junto con el ectodermo); Miotomo (que formará la musculatura de la espalda, de la pared corporal y de las extremidades); y Esclerotomo. Estas células emigrarán en dirección a la notocorda, rodeando el tubo neural y formarán el primordio de la columna vertebral. La diferenciación y transformación de las células del esclerotomo se produce de forma gradual, empezando en la zona cervical y avanzando hacia la zona caudal.

Las células del esclerotomo crecen hacia dentro, rodeando la notocorda, además del tubo neural (que será lo que forme algunas glándulas, nervios, cerebro, ganglios, etc.). Así, la notocorda queda como el cuerpo vertebral primordial y las células del esclerotomo formarán las apófisis transversas, los arcos vertebrales y las apófisis espinosas.

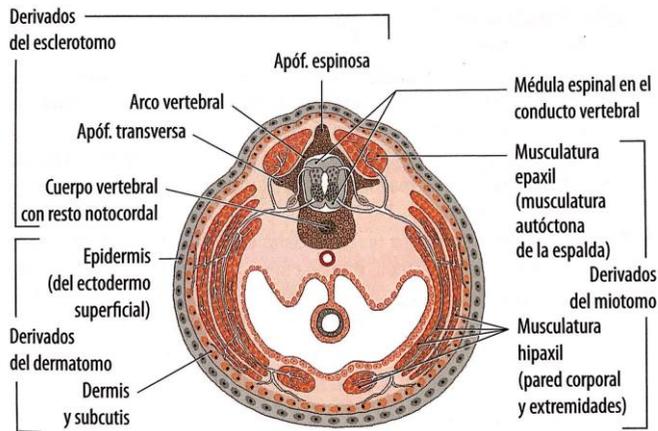


Figura 2.2. Corte transversal a la altura del abdomen. 8ª semana. (Tomado de Prometheus, 2010).

Después de que las células del esclerotomo hayan rodeado a la notocorda, ésta, en su mayor parte, degenera por apoptosis. Es ya en la quinta semana, durante el crecimiento en dirección caudal del canal neural, la notocorda y los esclerotomos cuando se produce una “segmentación” de lo que formará la columna primordial. El resto de las células notocordales que no degeneran, formarán parte de los discos intervertebrales y los núcleos pulposos.

Schultze (1896) describió que las células de notocorda restantes parecen estar localizadas en “fisuras” producidas entre los segmentos a lo largo de la columna primordial una vez que ha aparecido el miotomo.

La mesénquima (tejido conectivo embrionario) proviene del mesodermo y será lo que cree el tejido cartilaginoso y el tejido óseo. En su etapa inicial se diferencia en condroblastos (osteogénesis condral) formando el cartílago hialino el cual, posteriormente, será sustituido por tejido óseo.

Tomando en consideración todo lo anterior, en la formación de la columna vertebral se pueden reconocer tres etapas: (1) donde los segmentos del esqueleto se componen de tejido conectivo embrionario (mesénquima); (2) donde las células de la mesénquima se modifican para transformarse en células condroblásticas; y (3) dónde el cartílago se sustituye por hueso. Estas etapas se suceden de forma consecutiva comenzando aproximadamente en el segundo mes y terminando al comienzo del tercer mes, comenzando, por tanto, el proceso conocido como “osificación”.

### 2.1.2. Periodo de osificación.

En este periodo, el proceso de formación de hueso se da mediante la aparición de lo que se conoce como centros de osificación.

#### 2.1.2.1. Centros Primarios

Ubicados a lo largo de la columna vertebral se encuentran tres para cada segmento: uno en el cuerpo y uno para cada hemiarco. Estos tres centros suelen aparecer al mismo tiempo, aunque se ha observado que, en el sacro, el centro del cuerpo aparece ligeramente antes que los centros de los

hemiarcos. En el caso de la primera vértebra sacra, se estima que estos centros aparecen aproximadamente en el día 58 del feto.

Este proceso sigue los descritos anteriormente, son consecutivos y van avanzando desde la zona cervical a la zona más caudal de la columna. Aproximadamente, en el día 72, los centros se han extendido hasta la tercera vértebra sacra. Sobre el día 83 ya se ha avanzado hasta la última vértebra sacra (Mall, 1899).

Esta osificación es del tipo endocondral (osteogénesis condral). Durante el primer año, los centros de osificación de los arcos, en la mayoría de todas las vértebras, se unen dorsalmente estando completamente unidos al cuerpo entre los tres y seis años de edad.

#### 2.1.2.2. Centros secundarios: Epífisis.

Estos centros son muy similares a los primarios, solo que se pueden diferenciar en su localización. Generalmente, se encuentran en la epífisis de los huesos y, siguiendo el proceso de osificación endocondral, formarán el hueso desde el cartílago (Poirier y Chorpy, 1899).

### 2.1.2.3. Sacro

En el sacro se pueden encontrar hasta un total de 35 centros de osificación. En cada segmento se encuentran cinco centros de osificación: uno primario, el cual forma el cuerpo y cuatro secundarios que formarán las placas epifisarias superior e inferior y uno en cada hemiarco. Además, en los tres primeros segmentos del sacro, se encuentran más centros de osificación debido a la existencia de los elementos costales, los cuales se proyectan anterolateralmente y formarán las alas del sacro. Finalmente, encontramos dos placas epifisarias más a cada lado del sacro y que formarán toda la parte lateral que articula con el ilion (coxal).

Los primeros cambios ocurren en los cuerpos y en los hemiarcos, siguiendo el avance desde la columna lumbar. En el momento del nacimiento, las vértebras sacras se encuentran separadas por discos intervertebrales. Aproximadamente en el cuarto mes de vida se produce la osificación de los cuerpos y, sobre el quinto o sexto mes, la de los arcos. Sobre el segundo año de vida, las alas del sacro comienzan su formación y será aproximadamente desde entonces hasta el sexto año de vida cuando se unan los arcos a los cuerpos vertebrales.

Los procesos costales que se encuentran en las tres primeras vértebras sacras comienzan su osificación entre el quinto y el séptimo mes de vida fetal (Posth, 1897) y comenzarán su fusión coincidiendo con la pubertad. Las epífisis laterales y estos procesos costales se fusionan completamente sobre los 22 años.

Los cuerpos vertebrales irán creciendo y se fusionarán entre ellos, eliminando los discos intervertebrales. Esta fusión comienza aproximadamente en la segunda década de la vida. Las placas epifisarias comenzarán su fusión con los cuerpos sobre los 15 años y la fusión de los cuerpos vertebrales entre sí se dará en un proceso inverso al visto: desde la zona caudal hacia la craneal. La tercera y cuarta y la cuarta y quinta vértebras sacras se fusionan sobre los 22 años de edad; la segunda y la tercera, sobre los 23 y el último segmento (la primera y segunda) no suele completar su fusión hasta, en algunos casos, la cuarta década de la vida.

Las placas epifisarias que se encuentran en las caras laterales del sacro surgen de la fusión de los procesos transversos y completarán dicha fusión sobre los 25 años de vida (Fawcett, 1907).

### 2.1.3. Características del sacro durante su formación.

#### 2.1.3.1. Curvatura

La región sacra durante el segundo y tercer mes de desarrollo embrionario tiene una forma más recta, pero conforme avanza el desarrollo, adquiere una segunda flexión ventral. El sacro, debido a su posición, recibe el peso el cual transfiere hacia la pelvis y las extremidades inferiores y esto ocurre por su morfología similar a un triángulo. Por otro lado, la curvatura

dorsal y el ángulo sacrolumbar se dan en los mamíferos, viéndose, además, influenciados por la bipedestación en el caso de los humanos.

#### 2.1.3.2. Variación en el número de vértebras

Las regiones afectadas son aquellas en donde se encuentra una zona de unión entre segmentos de la columna. Las variaciones son frecuentes y, en algunas ocasiones pueden ser significativas a nivel clínico. Este tipo de variaciones en el número de vértebras se dan ya desde el periodo embrionario (Bardeen, 1904).

En el 95% de los individuos, la vigésimo quinta vértebra se corresponde con la primera vértebra sacra, aunque en el 1% de los individuos puede corresponderse con la vigésimo cuarta y en el 3%, con la vigésimo sexta. El número de vértebras sacras no está, por tanto, prefijado (Paterson, 1893; Rosenberg, 1876).

### 2.2. Anatomía del sacro.

#### 2.2.1. Términos útiles en anatomía sacra.

Proceso. Proyección de hueso, incluso articular.

Ala. Estructura con forma de ala.

Apófisis. Proceso formado desde un centro de osificación.

Cresta. Borde agudo.

Línea. Borde estrecho, menos prominente que la cresta.

Eminencia. Elevación basta pero estrecha.

Espina. Prominencia larga y aguda.

Tuberosidad. Prominencia redondeada.

Tubérculo. Pequeña tuberosidad.

Promontorio. Elevación correspondiente con el punto más anterosuperior (ventral) del sacro.

Foso. Agujero u hoyo pequeño

Foramen. Abertura redonda u oval. Generalmente ayuda al paso o anclaje de otros tejidos.

Canal. Paso estrecho

Surco. Depresión estrecha pero de cierta longitud.

Superficie, Faceta o Carilla articular. Área pequeña y lisa, generalmente cubierta por cartílago. Puede ser irregular y de mayor tamaño.

### 2.2.2. Descripción morfológica

El sacro es un hueso irregular, central, impar, simétrico y oblicuo que se sitúa al final de la columna vertebral y forma parte de la cintura pélvica. Está formado por cinco vértebras soldadas entre sí en forma de pirámide cuadrangular invertida.

La descripción morfológica expuesta en los siguientes apartados, según los diferentes planos, se realizará desde la zona craneal hacia la caudal del sacro.

#### 2.2.2.1. Cara anterior (Visión ventral)

En su cara anterior, el sacro presenta una curvatura cóncava en dirección sagital y transversal.

La primera estructura destacable es la base, donde se encuentra el promontorio, que es el borde sobresaliente de la primera vértebra sacra. Esta base articula con la quinta vértebra lumbar con un disco intervertebral cuneiforme y se encuentra orientada cranealmente.

Justo a los laterales del cuerpo de la primera vértebra sacra, se ubican las porciones laterales, o alas del sacro. Tienen una superficie generalmente lisa y se aprecian como dos proyecciones del cuerpo vertebral. Estas alas se forman debido a la fusión de los distintos procesos costales de las vértebras sacras.

Entre los distintos cuerpos vertebrales que observamos a lo largo del sacro, se observan las líneas transversales, que se corresponden con las líneas de fusión entre las distintas vértebras sacras. Estas líneas, además, se encuentran entre los llamados forámenes sacros anteriores. A través de estos

forámenes discurren los nervios que forman el plexo sacro (y que posteriormente en la pierna forman el nervio ciático).

El vértice del sacro, también conocido como ápex, se orienta caudalmente y cuenta con una superficie articular para el coxis.

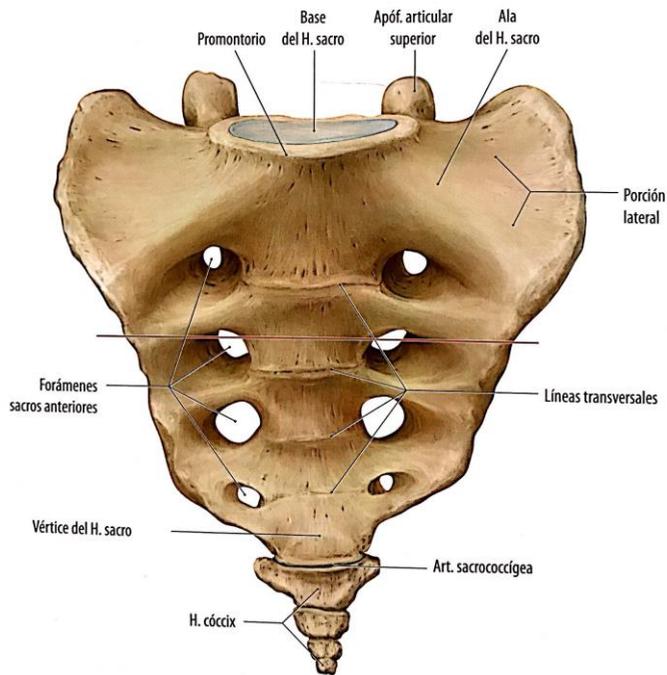


Figura 2.3. Visión ventral del Hueso Sacro. También se observa el coxis.

#### 2.2.2.2. Cara posterior (Visión dorsal)

Siguiendo la estructura de las vértebras en la columna, la primera vértebra sacra tiene en sus laterales la apófisis articular superior, donde se encuentra la faceta para articular con la quinta vértebra lumbar.

En la cara posterior y en el centro, podemos observar el conducto sacro, el agujero donde se aloja la cola de caballo. A los laterales encontramos las tuberosidades sacras. Estas tuberosidades son la parte dorsal de la porción lateral (ala), es decir, se forman por la fusión de los procesos costales y cuentan con unas impresiones profundas e irregulares debido a la inserción del ligamento sacroilíaco y la tuberosidad ilíaca.

La cresta sacra media, discurre craneocaudalmente por el centro del hueso sacro y es el resultado de la fusión de las apófisis espinosas de las vértebras sacras. A ambos lados de ésta, encontramos los canales del sacro y siguiendo lateralmente la cresta sacra intermedia, formada por la fusión de las apófisis articulares. Dicha cresta sacra intermedia, caudalmente termina en las astas del sacro (que se corresponden con las apófisis articulares inferiores de la quinta vértebra sacra).

El hiato sacro es una apertura existente entre las astas del sacro debido a la ausencia de formación del quinto arco vertebral.

Lateralmente a la cresta sacra intermedia se ubican los forámenes sacros posteriores, por donde tienen su salida los nervios clúneos medios. Y lateral a ellos, encontramos la cresta sacra lateral que resulta de la fusión de las apófisis transversas.

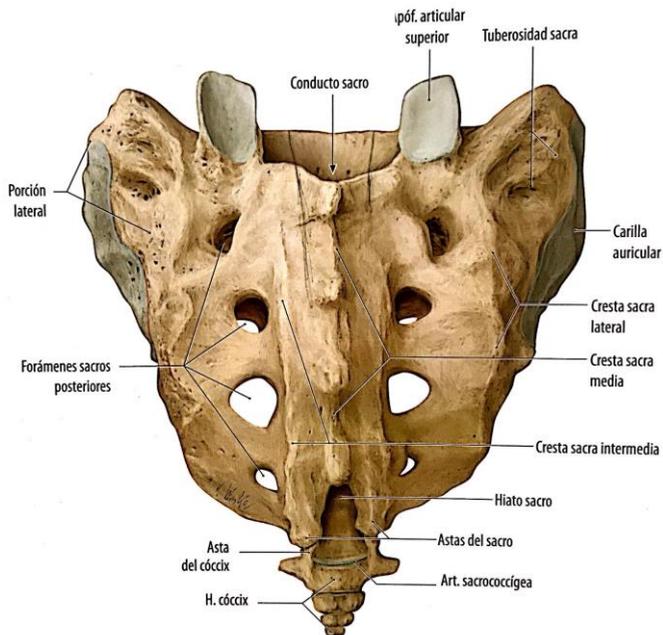


Figura 2.4. Visión dorsal del Hueso Sacro. También se observa el coxis.

### 2.2.2.3. Cara lateral (Visión lateral)

En su cara lateral, el sacro muestra unas carillas auriculares cóncavas que son las que articulan con el coxal y forman la articulación sacroilíaca.

Además, en su inmediatez posterior encontramos visible la tuberosidad sacra.

La parte más caudal es más estrecha, siguiendo la forma piramidal y en ella se aprecia la cresta sacra lateral acabando en el vértice.

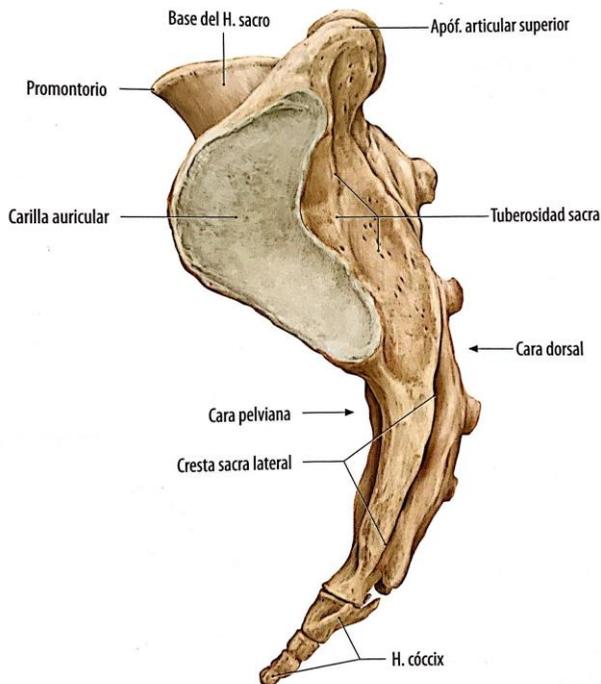


Figura 2.5. Visión lateral del Hueso Sacro. También se observa el coxis.

#### 2.2.2.4. Cara superior (Visión craneal)

Esta visión equivale a la parte más “plana” del hueso. Las partes más evidentes son la base del sacro, donde se encuentra el cuerpo de la primera vértebra sacra y, a sus laterales las porciones laterales o alas del sacro. En la parte más posterior, justo detrás del cuerpo encontramos el conducto sacro por donde discurre la médula espinal en su última expresión: la cola de caballo.

Por otro lado, y en la parte más dorsal del hueso encontramos la cresta sacra media, que como ya hemos mencionado, se forma mediante la fusión de las apófisis espinosas de las vértebras sacras.

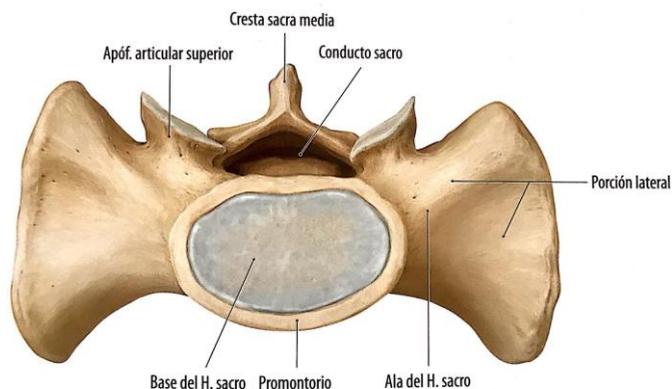


Figura 2.6. Visión craneal del Hueso Sacro.

### 2.2.2.5. Inserciones musculares

Varios músculos se insertan en el sacro los cuales se pueden diferenciar según su visión:

- Visión anterior:
  - Iliaco. En la parte más lateral y superior del ala. Interviene tanto en la articulación de la cadera (rotación y flexión) como en la columna lumbar.
  - Piramidal o Piriforme. Se inserta en la parte más lateral entre la segunda y la quinta vértebra sacra
  - Coccígeo. Se inserta en la parte más lateral y caudal del hueso. Junto con el anterior, son músculos elevadores del ano.
  
- Visión posterior:
  - Iliocostal, en su parte lumbar. Se inserta en la zona de la cresta sacra intermedia, continuando con la cresta iliaca.
  - Longísimo torácico. Se inserta en la zona de la cresta sacra intermedia. Junto con el anterior, tienen la función principal de erectores de la columna y contracción bi y unilateral de la misma.
  - Multifido. Su desarrollo máximo es en la zona lumbar, que es la que continua hasta insertarse en la zona de la cresta sacra intermedia en su porción más superior. Estos músculos discurren entre las apófisis espinosas (de las lumbares) con las apófisis transversas (en el caso del

sacro, la cresta sacra intermedia). Tiene la función de contracción unilateral (flexión y rotación) y bilateral (extensión de la columna).

- Dorsal Ancho. Se inserta a través de la fascia toraco-lumbar a la cresta sacra media.

- Glúteo Mayor. Se inserta en la parte más lateral, correspondiente a la cresta sacra lateral. Interviene principalmente en la rotación externa, retroversión (extensión), aducción y abducción.

#### 2.2.3.6. Articulaciones: ligamentos y movimientos

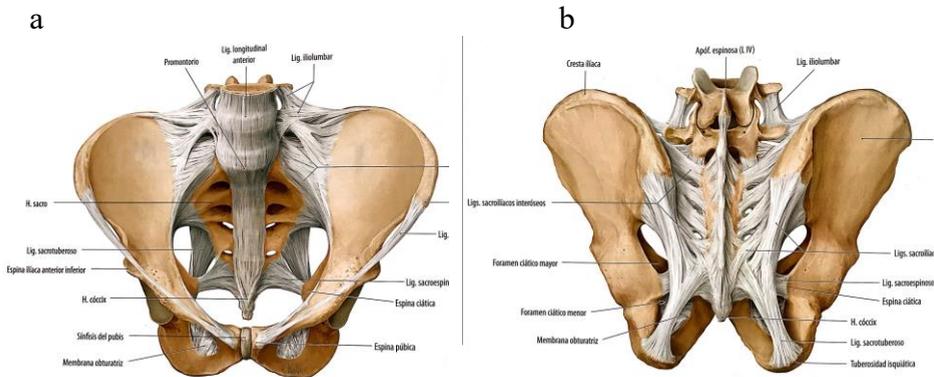
##### 2.2.3.6.1. Articulación sacroilíaca.

Aquí encontramos la carilla auricular descrita en la cara lateral del sacro. Tiene una forma más irregular que la carilla auricular del hueso iliaco y también se encuentra incurvada sobre sí misma. En la parte media cuenta con una depresión en la cual articulan las tuberosidades del hueso iliaco. El cartílago existente es bastante rugoso contando con mayor grosor el del lado sacro que el del lado iliaco.

El complejo ligamentario de esta articulación cuenta con:

- Ligamentos sacroilíacos anteriores, en la parte anterior del sacro. Estos se encuentran en el interior de la cintura pélvica.

- Ligamentos sacroilíacos posteriores, los cuales se encuentran en la parte dorsal del hueso.
- Ligamentos sacroilíacos interóseos. Se encuentran tapados por los anteriores y discurren detrás de la articulación sacroilíaca, desde la tuberosidad ilíaca hasta la tuberosidad sacra.



Figuras 2.7. y 2.8. Complejo ligamentario de la pelvis. En las fotografías se ha representado una pelvis masculina. a) visión ventral craneal; b) visión dorsal

Este complejo de ligamentos permite la bipedestación y la inmovilidad del hueso sacro hacia el interior de la cavidad pélvica. Además, los ligamentos sacroilíacos mayor y menor (sacro-tuberoso y sacro-espinoso respectivamente) unen el sacro con la tuberosidad isquiática y la espina cóccix respectivamente y colaboran en la inmovilidad del hueso hacia atrás.

#### 2.2.3.6.1.1. Movimiento de nutación.

Los movimientos de la articulación sacroilíaca influyen principalmente en la dimensión de la cavidad pélvica. El sacro tiene su movilidad muy restringida debido al complejo ligamentario que le rodea; sin embargo, se pueden observar, de forma mínima, movimientos de rotación y traslación.

El movimiento de rotación (nutación o basculante) consiste en un movimiento en el cual el promontorio puede desplazarse hacia delante (de forma caudal-ventral) o hacia atrás (ventral-caudal; contranutación). Cuando el movimiento de giro es hacia delante, el diámetro anteroposterior superior de la cintura pélvica se acorta mientras que el inferior aumenta. Este movimiento permite que las palas ilíacas se aproximen.

En la contranutación, el efecto es el contrario. Estos movimientos que realiza el sacro, al influir en las dimensiones del anillo pelviano, llegan a ser fundamentales en el proceso del parto.

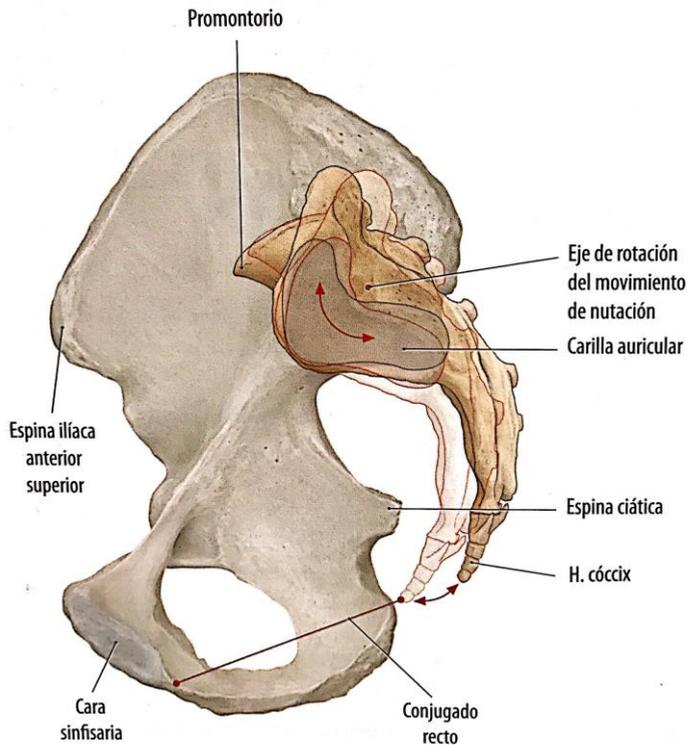


Figura 2.9. Movimiento de nutación de la articulación sacroilíaca (tomado de Prometheus, 2010).

### 2.2.3.6.2. Articulación sacrolumbar

Entre la primera vértebra sacra y la quinta vértebra lumbar encontramos un disco intervertebral cuadrangular con la misma estructura que para el resto de la columna vertebral: un anillo fibroso en el exterior y un núcleo pulposos en el interior. Este anillo se ve envuelto en el sistema

entrecruzado de anillo fibroso. Cada cuerpo vertebral entre sí, además del anillo, cuenta con una lámina de cartílago hialino.

Finalmente, en su cara anterior, baja atravesando toda la columna en su parte anterior, el ligamento longitudinal anterior.

#### 2.2.3.6.3. Articulación sacro-coxígea

En el vértice del sacro, coincidiendo con la parte inferior del cuerpo de la quinta vértebra sacra, encontramos de nuevo una articulación (anfiartrosis) con el coxis. Son dos superficies articulares de forma oval, transversalmente alargadas, unidas mediante los ligamentos sacrocoxígeos. Esta articulación permite el movimiento pasivo hacia atrás y hacia adelante del coxis.

CAPITULO 3. ESTIMACIÓN DEL SEXO EN ANTROPOLOGÍA  
FISICA



### 3.1. Aspectos generales en la estimación de sexo

Identificar el sexo implica uno de los grandes interrogantes cuando se estudian restos óseos, tanto a nivel arqueológico como a nivel forense.

Este rasgo no ofrece tantas dificultades como por ejemplo la edad, o la estatura debido a que es una variable dicotómica; es decir, solo caben dos posibilidades. La variación sexual se puede representar en una gráfica permitiendo su visualización mediante dos curvas de distribución normales con colas abundantes, dónde hay un punto en el cual se solapan. En ciertos casos, algunos individuos quedarán en la zona de solapamiento, por tanto, es importante encontrar buenos métodos que nos permitan realizar la estimación con la mayor exactitud posible.

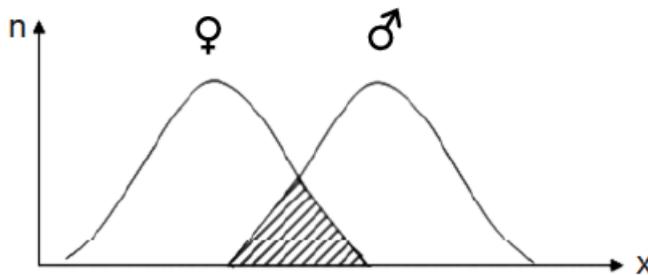


Figura 3.1. Gráfico de variación sexual con solapamiento. (Tomado de Krenzer, 2006)

En términos generales, los métodos utilizados para estimar el sexo se basan en dos diferencias biológicas entre hombres y mujeres: el tamaño y la arquitectura del hueso. A través de diferentes observaciones, se ha comprobado que los individuos masculinos, por norma general, tienen huesos más grandes y robustos que los femeninos. Esta diferencia se ha podido establecer y cuantificar en un 8%. Así, mediante el conocimiento de las diferencias de tamaño y arquitectura (morfología) entre ambos grupos se puede estimar el sexo a partir de los restos óseos.

Sin embargo, existen variaciones en determinadas características según el grupo humano a estudiar. Observando los estudios de Brothwell (1987) sobre el desarrollo supraorbital se podría inferir que: (i) la robustez o el tamaño del hueso no es una condición determinante para estimar el sexo y (ii) que los estudios se han de realizar dentro del mismo grupo poblacional por la variación entre grupos.

Si se realiza una descripción detallada de los huesos, la fiabilidad de estimar el sexo se acerca al 100% (Krogman, 1962; Stewart, 1979), sobre todo cuando se dispone de esqueletos completos y en buen estado de conservación. Sin embargo, con frecuencia estas condiciones no son posibles ya que, en muchas ocasiones, sobre todo en contextos arqueológicos, se contará con una parte del hueso o huesos aislados y fragmentados.

Cuando se analizan los huesos aislados, los resultados son menos satisfactorios, aunque se ha obtenido una fiabilidad del 98% en la

estimación del sexo mediante la pelvis y un 92% utilizando el cráneo. Ambas estructuras son consideradas como las que mejor reflejan las diferencias entre ambos grupos: masculino y femenino. Por otro lado, si consideramos otros métodos de estimación de sexo, como el uso de huesos largos, la fiabilidad desciende al 80% (Krogman e Iscan, 1986).

### 3.2. Métodos morfognósticos

Los métodos morfognósticos (cualitativos) se basan en el tamaño, robustez y forma del hueso para definir unas características concretas y poder establecer el nivel de dimorfismo sexual para cada hueso. En el caso de los adultos, la estimación del sexo es mucho más fiable que para los subadultos ya que las diferencias provocadas por los factores influyentes (como desarrollo hormonal, influencias socio-ecológicas o filiación ancestral) son más marcadas.

#### 3.2.1. Pelvis

Es una de las regiones anatómicas, o la mejor, donde mejor se reflejan las diferencias sexuales. Estas diferencias se explican, entre otros factores, por la adaptación morfológica de la cintura pélvica de la mujer para el alumbramiento. Durante la adolescencia, mientras que la pelvis masculina solo aumenta en proporción de tamaño, la pelvis femenina, además, se ensancha por el motivo previamente mencionado.

Como cintura pélvica se conoce a la estructura formada por los huesos coxales (iliacos o innominados), el hueso sacro y el hueso coxis. El hueso ilíaco, a su vez, está formado por tres huesos: el ilion, el isquion y el pubis. Las diferencias más marcadas, se dan principalmente en el hueso coxal.

Comenzando por las dimensiones generales de la pelvis, la femenina tiene una mayor proyección lateral, aportando anchura; mientras que la pelvis masculina es algo más estrecha, predominando la verticalidad. Es decir, la pelvis femenina es más corta (braquipélica) y ancha, mientras que la pelvis masculina es más alargada (dolicopélica) y estrecha.

En una visión craneal/superior existe otra diferencia según la forma de la pelvis: los hombres presentan una forma de corazón mientras que las mujeres presentan una forma ovalada.

Separando la pelvis podríamos realizar una descripción de las estructuras más dimórficas y sus características según el sexo:

- Escotadura ciática:
  - Femenina: más ancha y abierta, similar a una forma de “U”. El ángulo que describe es de unos 60°.
  - Masculina: más estrecha y profunda describiendo una forma de “V”. El ángulo, por tanto, es menor de unos 30°.

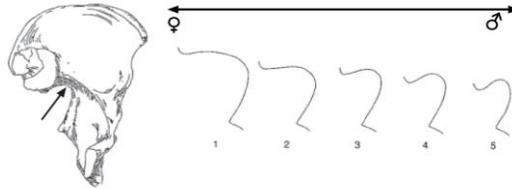


Figura 3.2. Esquema de escotadura ciática (tomado de Krenzer, 2006)

- Ángulo subpúbico: Es el ángulo que forman ambos pubis cuando están articulados.
  - Femenina: Es más abierto, en forma de “U”. Generalmente es mayor a los 90°.
  - Masculina: Es más cerrado, en forma de “V”. Generalmente se encuentra entre los 65 y los 70°.

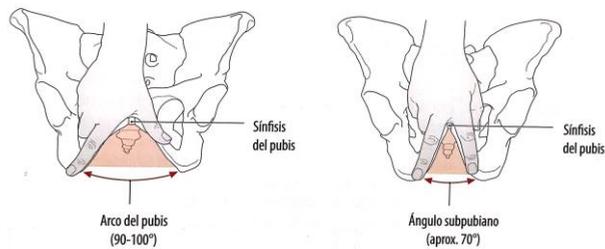


Figura 3.3. Ángulo subpúbico (tomado de Prometheus, 2010)

- Pubis: En términos generales, el pubis femenino es más bajo y ancho, con forma trapezoidal; el pubis masculino es más alto y estrecho. Phenice (1969) propuso unos criterios que permiten discernir el sexo del individuo hasta en un 95%.

- Arco ventral: En una visión anterior del pubis. Es a una protuberancia en la parte inferior del pubis, otorgándole una forma más cuadrangular.

- Femenino: Presente
- Masculino: Ausente

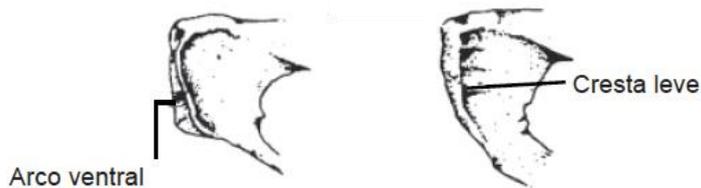


Figura 3.4. Arco ventral (tomado de Krenzer, 2006)

- Concavidad subpúbica: En una visión posterior, se observa la rama descendente del pubis.

- Femenino: La rama hace una forma cóncava.
- Masculino: La rama hace una forma convexa o recta.

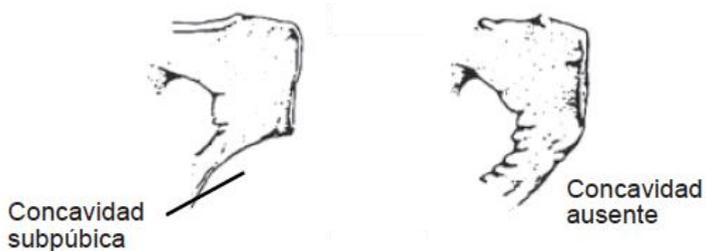


Figura 3.5. Concavidad subpúbica (tomado de Krenzer, 2006)

Rama isquiopúbica: Hace referencia al grosor de la rama que une ambos huesos (isquion y pubis). Se observa desde una vista lateral interna.

- Femenino: La rama es más estrecha y fina, incluso afilada.
- Masculino: La rama es más ancha, con una superficie medial amplia.



Figura 3.6. Rama isquiopúbica (tomado de Krenzer, 2006)

### 3.2.1.1. Otros caracteres morfológicos

Además, existen otros caracteres que pueden ser analizados y que permiten evaluar el dimorfismo sexual presente en la cintura pélvica. Se detallan algunos de ellos en la tabla 3.1.

### 3.2.1.2. Traumas por embarazo y postparto

Los traumas o cicatrices del embarazo y del parto se estudian en la cara dorsal del pubis y en el surco preauricular, localizado en el ilion, justo bajo la faceta auricular.

En la cara interna del hueso pubis, debido a los esfuerzos, hemorragias, etc. de la musculatura y ligamentos insertados en el mismo pubis, pueden aparecer depresiones en la cara dorsal del pubis, similares a pequeñas cicatrices. Este parámetro es variable debido a la multiparidad y a los alumbramientos por cesárea.

El surco preauricular, generalmente, solo se encuentra en las mujeres. En mayor o menor medida se encuentra presente y puede darse el caso de que solo exista en uno de los lados. Este surco aumenta su tamaño sobre todo en casos de partos múltiples o laboriosos. En el caso de los hombres puede existir, aunque siempre de forma muy leve.

Tabla 3.1. Características dimórficas de la pelvis. (Buikstra y Ubelaker, 1994)

|                          | <b>Femenino</b>                  | <b>Masculino</b>   |
|--------------------------|----------------------------------|--|
| <b>Acetábulo</b>         | Situación anterolateral          | Grande con direccionalidad lateral   |
| <b>Agujero Obturador</b> | Pequeño con forma triangular     | Grande con forma oval  |
| <b>Faceta auricular</b>  | Más acortada, estrecha           | Más alargada, ancha. Generalmente se extiende hasta el tercer segmento del sacro |
| <b>Cresta ilíaca</b>     | Curvada, con forma de S aplanada | Curvada con forma de S sinuosa   |
| <b>Fosa ilíaca</b>       | Baja y ancha                     | Alta y estrecha  |

### 3.2.2. Cráneo

Es la otra estructura estudiada para determinar el sexo, entre otros rasgos. En líneas generales, se entiende que el cráneo masculino es más grande, pesado y robusto que el femenino, el cual será más pequeño y grácil. Además, el masculino cuenta con unos caracteres más marcados y un volumen ligeramente superior (Brothwell, 1987).

El estudio y definición de las características dimórficas en el cráneo se puede realizar según la norma o plano de estudio:

#### 3.2.2.1. Norma frontal

Siguiendo lo expuesto anteriormente, la cara masculina suele ser algo mayor que la cara femenina.

Tabla 3.2. Características craneales de norma frontal (Buikstra y Ubelaker, 1994)

|                            | <b>Femenino</b>                         | <b>Masculino</b>           |
|----------------------------|---|----------------------------|
| <b>Glabela</b>             | Más aplanada, lisa y poco sobresaliente | Más prominente y saliente. |
| <b>Arcos superciliares</b> | Débiles, poco evidentes                 | Marcados y desarrollados   |
| <b>Órbitas</b>             | Redondas, bajas y estrechas             | Cuadrangulares, anchas     |
| <b>Margen supraorbital</b> | Cortante o de borde anguloso            | Borde romo, redondeado     |
| <b>Apertura nasal</b>      | Ancha                                   | Alta y estrecha            |
| <b>Huesos cigomáticos</b>  | Finos y estrechos                       | Robustos y más voluminosos |
| <b>Paladar óseo</b>        | Forma parabólica                        | Forma de “U”               |

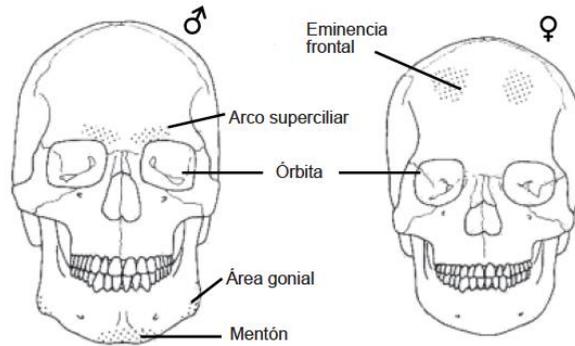


Figura 3.7. Norma frontal (tomado de Krenzer, 2006; modificado, según Herrmann et al., 1990).

### 3.2.2.2. Norma sagital

De forma general, el cráneo femenino tiende a conservar una apariencia juvenil, grácil y con eminencias en el frontal y parietal.

Tabla 3.3. Características craneales de norma lateral (Buikstra y Ubelaker, 1994)

|                            | <b>Femenino</b>                             | <b>Masculino</b>              |
|----------------------------|---|-------------------------------|
| <b>Inclinación frontal</b> | Más vertical y liso                         | Inclinado hacia atrás         |
| <b>Apófisis Mastoides</b>  | Pequeñas y redondeadas.<br>Poco salientes   | Grandes, robustas y salientes |
| <b>Arco cigomático</b>     | Delante del Conducto Auditivo Externo (CAE) | Atrás del CAE                 |
| <b>Crotáfites</b>          | Poco marcada                                | Muy marcada                   |

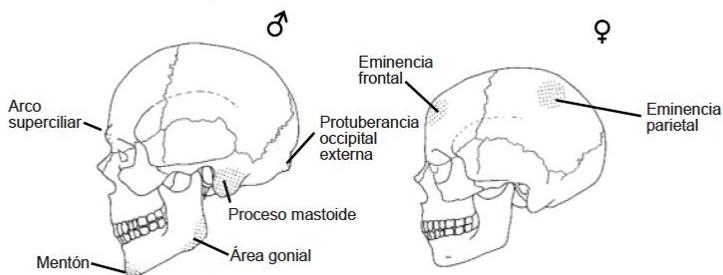


Figura 3.8. Norma lateral (tomado de Krenzer, 2006; modificado, según Herrmann et al., 1990).

### 3.2.2.3. Norma posterior

Tabla 3.4. Características craneales de norma posterior (Buikstra y Ubelaker, 1994)

|                               | <u>Femenino</u>         | <u>Masculino</u>       |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Inion</b>                  | Poco marcado o saliente | Muy marcado y saliente |
| <b>Líneas Nucleas</b>         | Poco evidentes. Liso.   | Muy evidentes. Rugoso  |
| <b>Inserciones musculares</b> | Poco marcadas.          | Muy marcadas           |

#### 3.2.2.4. Norma inferior

Tabla 3.5. Características craneales de norma inferior (Buikstra y Ubelaker, 1994)

---

|                             | <u>Femenino</u>     | <u>Masculino</u> |
|-----------------------------|---------------------|------------------|
| <b>Foramen Magnum</b>       | Menor diámetro      | Mayor diámetro   |
| <b>Cavidades Glenoideas</b> | Más pequeñas, finas | Más grandes      |
| <b>Cóndilos occipitales</b> | Más pequeños        | Mayor tamaño     |
| <b>Apófisis Estiloides</b>  | Más corta y delgada | Larga y gruesa.  |

---

#### 3.2.2.5. Mandíbula

Esta estructura se considera en la estimación del sexo dentro del cráneo ya que forma parte de la cara del individuo. Siguiendo las consideraciones previas, la mandíbula masculina cuenta con un mayor tamaño general que la femenina. Aun así, se pueden considerar unas estructuras concretas para realizar el análisis de estimación de sexo:

Tabla 3.6. Características mandibulares (Buikstra y Ubelaker, 1994)

|                        | <b>Femenino</b>     | <b>Masculino</b>                          |
|------------------------|---------------------|---|
| <b>Mentón</b>          | De forma redondeada | Triangular y prominente                   |
| <b>Ángulo goniaco</b>  | Llano y obtuso.     | Prominente y menos obtuso (menor de 125°) |
| <b>Rama mandibular</b> | Delgada, más grácil | Gruesa y ancha. Más vertical.             |
| <b>Cóndilos</b>        | Pequeños            | Grandes                                   |
| <b>Arco dental</b>     | Parabólico          | En forma de “U”                           |
| <b>Dientes</b>         | Más pequeños        | Más grandes                               |
| <b>Gonios</b>          | Redondeados         | Cuadrangulares                            |

### 3.3. Métodos morfométricos

Cuando se estudian restos óseos que provienen de excavaciones arqueológicas, o que son restos aislados, es frecuente que sus condiciones no sean óptimas para poder observar los rasgos de diferenciación sexual más característicos. En los casos forenses, se dan ciertas ocasiones en las que la estimación también se ha de realizar con pequeños fragmentos de huesos o con pocos de ellos, por lo que se comenzaron a buscar métodos alternativos (cuantitativos) que permitieran realizar la estimación del sexo a través de otras regiones anatómicas (Stewart, 1979).

Estos métodos, en un principio buscaron rasgos dimórficos en el esternón, la clavícula o el húmero sin mucho éxito. Tras ello, se comenzaron a usar métodos en los que se incluía una variable como, por ejemplo: la longitud del hueso, para poder estimar el sexo únicamente mediante la diferencia de tamaño. Finalmente, estos métodos se fueron desarrollando hacia el uso de más variables combinadas en funciones discriminantes para poder estimar el sexo de una forma más fiable.

Desde 1950 se han ido desarrollando tanto funciones discriminantes como fórmulas de regresión para estimar el sexo haciendo uso de huesos poscraneales (en los cuáles se incluye la pelvis). Con la finalidad de poder utilizar el mayor número de estructuras óseas para aportar una mayor cantidad de datos, se comenzaron a medir los huesos largos, la pelvis, los huesos del tarso, vértebras e incluso los extremos esternales de las costillas.

La gran mayoría de las investigaciones relacionadas desarrollaron métodos de estimación del sexo en base a los diferentes grupos ancestrales (especialmente entre Blancos y Negros). De esta manera, cuando se conocía y se consideraba el grupo ancestral –como ocurría sobre todo en los trabajos en los que se usaban medidas craneales- la fiabilidad de aplicación de los métodos era superior. (Giles y Elliot, 1963).

Por otra parte, y en relación con el estudio y desarrollo de metodologías para la estimación del sexo, se destacan las primeras investigaciones de diversos autores (Stewart, 1979; Krogman e Iscan, 1986; Bennett, 1993; Bass, 1995) en las cuales se estudian longitudes de huesos largos, como húmero y fémur, y escápula para poder determinar el sexo de los individuos, entre otros rasgos, como la altura. Estas medidas abarcaban, por ejemplo: la longitud glenoidea (en la escápula), el diámetro vertical de la cabeza (en el húmero), o la longitud total (en el fémur).

Tras todos estos estudios, el uso de la morfometría se fue extendiendo y los investigadores comenzaron a aplicarla en sus muestras con la finalidad de poder aportar datos específicos para cada población y así mantener los estándares de calidad en el campo de la Antropología Forense. En el caso de la población mediterránea, encontramos las funciones discriminantes de Alemán (1997) en las cuales se detallan múltiples funciones mediante medidas de huesos largos, escápula, tarso, etc.

A pesar de todo el camino recorrido, aún queda trabajo por realizar, validando los métodos y creando metodologías nuevas que se adapten a las poblaciones recientes, ya que dos poblaciones no van a ser idénticas debido a las influencias genéticas, culturales o medioambientales (Alemán, 1999).

## CAPITULO 4. OBJETIVOS



El objetivo principal de esta tesis doctoral ha sido conocer y estudiar la morfología del sacro analizando su dimorfismo sexual, así como desarrollar y validar nuevas metodologías, basadas en medidas lineales y técnicas morfogeométricas, poder estimar el sexo en individuos adultos.

A continuación, el objetivo general del estudio se puede desglosar en objetivos específicos planteados en el desarrollo de este trabajo:

1. Evaluar el error existente en las observaciones a nivel interobservador e intraobservador.
2. Determinar el nivel de dimorfismo sexual del sacro mediante el análisis de variables métricas.
3. Obtener unas fórmulas de regresión logística binaria que ayuden a estimar el sexo con un nivel aceptable de clasificación correcta
4. Analizar el dimorfismo sexual en base a criterios de forma y tamaño.
5. Determinar si existe diferencia en la forma de la curvatura sacra entre el sexo masculino y el femenino.
6. Evaluar la fiabilidad de clasificación diferencial de la variable de forma y las variables de forma y tamaño
7. Analizar el nivel de dimorfismo sexual del sacro entre poblaciones

8. Realizar la validación de las fórmulas de regresión logística comprobando su aplicabilidad.

## CAPITULO 5. MATERIAL



### 5.1. Contexto de las colecciones estudiadas.

La muestra del siguiente estudio está compuesta por 3 series osteológicas procedentes de cementerios actuales, localizadas dos de ellas en la Comunidad Autónoma de Andalucía (sur de la Península Ibérica) y otra en la ciudad de Toronto (Canadá).

### 5.2. Colecciones que componen la muestra.

La muestra total incluida en la presente tesis doctoral está formada por 541 individuos, todos ellos adultos, de los cuales 363 son de sexo masculino y 178 son de sexo femenino.

#### 5.2.1. Colección del Cementerio Municipal de San José de Granada (Granada).

La colección procedente del Cementerio de San José de Granada está formada por un total de 424 individuos; de los cuales 229 son individuos adultos -125 son de sexo masculino y 104 son de sexo femenino-.

Se trata de una colección de individuos adultos e infantiles, identificada con sexo, fecha de nacimiento, causa, fecha, hora y lugar de defunción, último domicilio conocido, nombre del padre y de la madre, y

calidad del féretro conocidos. Todos estos datos han sido obtenidos de las actas de defunción del Registro Civil y del Cementerio, contando con el necesario compromiso de confidencialidad.

Las fechas de muerte de esta muestra son relativamente recientes – entre el año 1871 a 2001-, que, junto a los métodos de enterramiento, hacen que los restos se encuentren en buen estado de conservación.

Debido a todos los datos de los que se dispone y su estado de conservación, hacen que esta muestra pertenezca a una colección de referencia para estudios de poblaciones osteológicas. En el estudio de Alemán y colaboradores (2012) se puede obtener todavía más información.

### 5.2.2. Colección del Cementerio Municipal de Órgiva (Granada).

La colección procedente del Cementerio de Órgiva de Granada está formada por un total de 113 individuos: de los cuales 63 son de sexo masculino y 49 son de sexo femenino.

Es una colección de individuos adultos e infantiles identificada con sexo, nombre y fecha de defunción. Estos datos, entre otros, se han obtenido de las actas de defunción del Registro Civil y del Cementerio, contando también con el compromiso de confidencialidad.

Las fechas de defunción son relativamente recientes –siglo XIX-, que, unido al modo de enterramiento, hacen que esta colección tenga un buen estado de conservación.

### 5.2.3. Colección Osteológica de Grant (Toronto).

La colección osteológica de Grant (Toronto) está formada por un total de 200 individuos: de los cuales 175 son de sexo masculino y 25 son de sexo femenino.

La colección está formada por individuos adultos de los que se ha proporcionado la información requerida para el estudio: sexo, edad y causa de defunción. Las fechas de defunción son recientes – entre 1931 y 1951- que junto con el modo de enterramiento y su procedencia (autopsias) hacen que los individuos tengan un excelente estado de conservación.

En el estudio redactado por Elizabeth Salter (1987) se puede encontrar más información de la muestra (Toronto).

Gracias a sus características demográficas, su estado de conservación y todos los datos *antemortem* disponibles, las muestras de estudio son idóneas para desarrollar proyectos de investigación centrados en

el área de la Antropología Forense. Para este estudio se ha contado con tres poblaciones distintas: una de ellas para el desarrollo y creación de los métodos y dos para la validación del método de regresión logística.

## CAPITULO 6. METODOLOGÍA



## 6.1. Factores Limitantes

Antes de comenzar con el proceso de obtención de los datos, hemos de considerar que el esqueleto humano en ciertas ocasiones es una de las principales fuentes de información de procesos biológicos o del continuo salud-enfermedad, afectándose por tanto las estructuras óseas con ciertas enfermedades.

El paso previo a la obtención de los datos consistió en valorar los factores limitantes mediante la observación de las lesiones patológicas que afectan a la morfología del hueso. De esta forma, se excluyen aquellos individuos que muestran alterada la estructura ósea, con el fin de evitar errores.

Sin embargo, no siempre un sacro que presenta uno o varios factores limitantes ha de ser excluido del estudio, sino que serán solo determinados análisis para los que es válido.

A continuación, se expone la patología y/o factores limitantes que se han encontrado o se han tenido en consideración para el presente estudio:

#### - Sacralización y lumbarización.

Estos dos procesos se diferencian según la fusión resultante entre la quinta lumbar y la primera vértebra sacra. La sacralización se refiere al proceso de fusión de la quinta vértebra lumbar con la primera sacra, quedando unida por tanto al sacro. Sin embargo, en la lumbarización, la primera vértebra sacra no se fusiona con el resto del sacro, resultando equivalente a lo que sería una vértebra lumbar adicional.

#### - Artrosis

Consiste en una patología degenerativa en la cual se produce lesión del cartílago articular. En el sacro se puede dar al igual que en el resto de los huesos pese a su movimiento limitado. Aquí se produce dolor mecánico debido a la inflamación y la rigidez, que mejora con el reposo. Junto con el desgaste óseo, y durante el transcurso de la enfermedad, pueden darse reacciones exostósicas que producen osteofitos, pudiendo desencadenar una anquilosis de las estructuras anejas.

#### - Agenesia

También se denomina agenesia lumbosacra o agenesia caudal. Consiste en una malformación congénita que forma parte del síndrome de regresión caudal. Entre otras anomalías, la columna caudal está ausente. Esta ausencia puede variar desde una agenesia parcial a deformidades más

graves. Generalmente se puede asociar a defectos en el cierre del tubo neural y malformaciones de la médula espinal como, por ejemplo: estrechamiento del canal óseo, o mielomeningocele, entre otras (Hernández, 2013).

#### - Espina bífida

Consiste en una malformación congénita que cursa con un cierre incompleto del tubo neural al final del primer mes de vida embrionaria y, por ende, un cierre incompleto de las últimas vértebras en la parte dorsal del hueso. En su mayoría el tratamiento consiste en cirugía con la finalidad de prevenir daños en el tejido nervioso y prevenir así la infección. La sintomatología incluye: hidrocefalia, alteraciones del aparato locomotor (como debilidad muscular o parálisis), trastornos genito-urinarios (como por ejemplo una incontinencia vesical), dificultades en la memoria o concentración, etc.

#### - Cáncer

El sacro se ha establecido como uno de los principales lugares para el desarrollo de sarcomas, denominados condrosarcomas, que se derivarían de los remanentes de la notocorda embrionaria.

- Problemas relacionados con la conservación del mismo

En ciertas ocasiones el estado de conservación de la estructura ósea no es el apropiado para realizar estudios o análisis concretos. Las condiciones de conservación del mismo influyen para el mantenimiento de su integridad y su posterior idoneidad para poder realizar los análisis pertinentes.

6.2. Criterios de calidad en el desarrollo de nuevas metodologías:  
Evaluación del Error de las observaciones.

De forma independiente al tipo de investigación que se realice, la validez de los resultados está influenciada por la fiabilidad en la adquisición de los datos obtenidos. Por ello, se hace necesario elaborar metodologías que permitan evaluar y cuantificar la precisión que ofrecen los análisis realizados por los investigadores.

La tasa de error de un método puede estar referida en varios aspectos como la significancia de los resultados, el intervalo de confianza, la probabilidad de error, etc. (Christensen, 2009). Para cuantificar dicha tasa se ha de evaluar el grado de ajuste entre la estimación realizada y el valor correcto que ofrece el método y, además, evaluar de forma detallada el margen del error intra- e interobservador.

### 6.2.1. Error de Medición

El error de medición (EM) viene definido como la variabilidad de las mediciones repetidas de un carácter concreto de un espécimen, con respecto al valor real de su medición y su variabilidad entre individuos en grupos particulares (Bailey y Brynes, 1990). Este error puede ser de dos tipos:

1. Aleatorio: corresponde a una desviación de las medias en la varianza de los parámetros estimados. Se introduce de manera aleatoria y se distribuye con relación al verdadero valor de la cantidad medida, pudiendo original falsos modelos (Goodall y Mardia, 1993; Mardia y Dryden 1994, Gómez-Robles, 2010).

2. Sistemático: introduce una parcialidad constante con respecto al valor verdadero de medición. Ocurre por la desviación direccional y repetida de las medias, con carácter no aleatorio (Arnqvist y Martensson, 1998).

Esta “incertidumbre” o duda sobre el resultado de una determinada medición se relaciona con la eficacia y aplicabilidad de cada método teniendo conceptos asociados:

### 6.2.1.1. Exactitud y Precisión.

Estos dos conceptos permiten describir la relación entre un valor numérico estimado con el valor real correspondiente.

- La precisión se refiere a la dispersión de los resultados obtenidos cuando se aplica un método repetidas veces, sobre una misma población de individuos con características similares, es decir, la proximidad de las medidas repetidas para una misma cantidad (Harris y Smith, 2009). Este concepto también puede verse definido como repetibilidad, o concordancia (Latour et al., 1997).

- La exactitud se define como la proximidad de los valores medidos al valor verdadero, es decir, la desviación del valor estimado con respecto al valor real. Por ello, se habla de exactitud cuando no existe tendencia significativa a la sobreestimación o infraestimación del valor.

Ambos conceptos dependen de factores diferentes y, por tanto, su interpretación conjunta permite comprobar su aplicabilidad y reproducibilidad. Estos factores, pueden apreciarse considerando 4 métodos hipotéticos según el resultado de precisión y exactitud:

a) Método poco exacto y poco preciso: El intervalo mostrado es muy amplio con una probabilidad reducida de que la estimación se corresponda con la real. La variable estaría poco relacionada con el carácter estimado.

b) Método poco exacto pero muy preciso: El intervalo estimado es pequeño, sin embargo, es poco probable que el valor real se encuentre dentro del intervalo. Esto se suele dar cuando el volumen de la muestra es muy reducido.

c) Método muy exacto pero poco preciso: El intervalo de estimación es muy amplio teniendo elevada probabilidad de contener el valor real. Esta condición se cumple cuando se combina información de diversas poblaciones muy diferentes entre sí.

d) Método muy exacto y muy preciso: El intervalo resultante es reducido, contando además con una probabilidad muy alta de contener el valor real. En este caso, se cuenta con características ideales y se cumple cuando se han empleado grandes muestras de estudio y variables muy precisas y aplicadas a la población de origen.

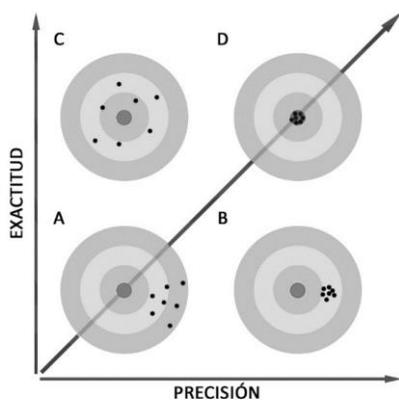


Figura 6.1. Representación gráfica esquemática de los conceptos de exactitud y precisión. A, no hay exactitud ni precisión; B, no hay exactitud pero si precisión; C, hay exactitud pero no precisión; D, hay precisión y exactitud. (tomado de López-Lázaro, 2015)

### 6.2.1.2. Sensibilidad y Especificidad

En ciertas ocasiones las metodologías utilizadas ofrecen un valor cualitativo, es decir, que no ofrecen un valor numérico, sino que informan de la posibilidad o no de cumplir una condición. Los conceptos de sensibilidad y especificidad se emplean en estos casos con el fin de poder evaluar la validez del método.

- La sensibilidad hace referencia a la capacidad del método para detectar positivos, es decir, que cumplen la condición.

- La especificidad hace referencia a la capacidad del método para detectar negativos, es decir, los que no cumplen la condición establecida.

En ambos conceptos también influyen diferentes factores provocando combinaciones según las características y ayudando así a su interpretación.

a) Método muy sensible y muy específico: la detección de positivos y negativos es muy alta, separando eficientemente a los especímenes.

b) Método muy sensible pero poco específico: la detección de positivos es muy alta pero no lo es para los negativos, haciendo que éstos puedan clasificarse como positivos. A estos se les denomina como “falsos positivos”.

c) Método poco sensible pero muy específico: la detección para negativos es alta pero no para los positivos, por lo que puede clasificar a positivos como negativos, resultando en los “falsos negativos”.

d) Método poco sensible y poco específico: la detección de positivos y negativos es baja por lo que el método es ineficaz.

### 6.2.1.3. Causas de variación en el error de medición.

La precisión de los resultados depende de una serie de factores capaces de alterar la variación entre las mediciones: (i) la variabilidad biológica intragrupal de la muestra de estudio; (ii) el instrumento empleado y su utilización en la toma de las variables (calibrado, mantenimiento...); (iii) el procedimiento o metodología utilizada; (iv) la destreza del investigador en la toma de variables (entrenamiento, experiencia, conocimientos, etc.) (Rabinovich, 1995).

### 6.2.2. Cálculo del error intra- e interobservador

Como sucede con las diferentes técnicas o metodologías de recogida de datos en una investigación científica, este proceso ha de ser evaluado con el objetivo de garantizar que pueda ser reproducible y repetible.

El error de medición, conocido también como confiabilidad, fiabilidad o concordancia de la medida (en inglés, *reliability*) pone de manifiesto en qué medida el estudio es repetible ya bien por el mismo observador, o por otro diferente, obteniendo resultados similares (Madrigal, 1998; Ferrante, 2009). Se consideran dos tipos de error de medida:

- Error intraobservador: se relaciona con la repetitividad de los análisis, es decir, que el mismo observador obtenga los mismos resultados cuando el proceso de recogida de datos se repita.

- Error interobservador: se relaciona con la reproducibilidad de los análisis, es decir, que un observador diferente obtenga los mismos resultados cuando realice el proceso de recogida de datos.

El procedimiento de cálculo de ambos errores se basa en la repetición de la toma de datos tanto por el mismo observador como por un observador independiente. Estos nuevos valores se compararán estadísticamente con los resultados originales. La repetición de estas medidas cuenta con unos requisitos a nivel metodológico:

1. Dicha repetición no se debe de realizar de forma inmediata a la primera recogida de datos; es decir, se precisa un tiempo entre las diferentes tomas de datos.

2. El instrumento de medida ha de ser el mismo para evitar el error de diferencias de precisión derivadas del instrumento de medida.

3. La muestra utilizada para la segunda toma de datos ha de ser aleatoria.

4. Dicha muestra aleatoria, además, debe ser representativa para cada uno de los grupos o categorías que conformen el estudio; por ejemplo, en el caso de este estudio, para los hombres y las mujeres.

Los modelos estadísticos que comparan las series de datos son muy variados y tienen el objetivo de cuantificar las diferencias significativas, o no entre las distintas variables. La elección del modelo dependerá de la distribución de los datos y las características de las variables.

Finalmente, es de vital importancia considerar que todos los análisis desarrollados son pruebas paramétricas, por lo que su utilización se enmarca dentro de unos requisitos como: (i) la distribución normal de los datos de la muestra, o (ii) la igualdad de varianzas. De esta forma, si alguno de ellos no se cumple, el análisis del error de medición se encuadra en la utilización de pruebas no paramétricas que describan las diferencias observadas.

### 6.3. Análisis de Regresión Logística Binaria.

Los métodos para estimar el sexo generalmente se basan en clasificar y asignar a un individuo con unas características conocidas dentro de un grupo de población. Se cuenta con unos grupos preestablecidos en los cuales hay una serie de características que los individuos cumplen; es decir, permite diferenciar unos factores de otros en función de las características individuales que se presenten en la población (Bisquerra, 1989).

Con el análisis discriminante se pretende diferenciar grupos de población a partir de unas variables o características conocidas. En el presente estudio, los grupos son en base al sexo (hombre - mujer). El análisis permitirá discriminar qué variables consiguen diferenciar los grupos formados. Fisher (1936) introdujo el concepto de función discriminante la cual “es una ecuación lineal con una variable dependiente que representa la pertenencia a un grupo”.

Generalmente, cuando se opera con dos grupos de población, la función discriminante es una ecuación de regresión múltiple en la que la variable es dicotómica puesto que puede tomar dos valores, teniendo en cuenta la posibilidad de introducir una mayor cantidad de variables en el análisis.

Para diferenciar entre grupos se ha de tener en cuenta que el tamaño muestral debe ser equivalente entre grupos (homogeneidad), además de que la muestra debe ser amplia y aleatoria con respecto al rasgo o variable objeto de estudio. Además, las medias, desviaciones típicas, igualdad de varianzas, normalidad, etc.; es decir, los test paramétricos estadísticos deben de cumplir sus asunciones (Bisquerra, 1936). Por el contrario, cuando se cuentan con muestras reducidas, se ha de valorar que los posibles excesos de ajuste serán irreales y que por ello se interpretan como información orientativa (Irurita, 2014).

Para el diseño y desarrollo de un método se recomienda conocer y controlar todas las características inherentes a la muestra y que pueden influir en la variable de estudio. En el presente estudio se pueden considerar la edad de los individuos, el origen poblacional, el estatus social, etc. Por ello, se resalta la importancia del estudio de colecciones identificadas; así, las variaciones en la variable analizada se pueden explicar en función del parámetro de estudio, en nuestro caso, el sexo del individuo.

### 6.3.1. Obtención de los datos

#### 6.3.1.1. Definición de Variables

El desarrollo de un método se realiza a partir de unas variables, que son los datos que se recogen para su posterior análisis y que, tras todo ello,

aportarán unos resultados. Estas variables influyen, según su tipo, en el diseño del estudio que posteriormente se realizará con ellas.

#### 6.3.1.1.1. Variables Continuas

Son aquellas que pueden tomar cualquier valor dentro de un intervalo finito o infinito. Estas variables tienen el inconveniente de que nunca podrán ser tomadas con exactitud y por ello aparece un margen de error que viene dado por la precisión del instrumento de medida (Madrigal, 1998; Rosing, 2007).

Los métodos dentro de la Antropología Forense donde se aplican estas variables son los que evalúan el tamaño, las proporciones o la forma a través de mediciones como por ejemplo la altura del sacro. Uno de los métodos que se puede utilizar es el análisis de regresión (Madrigal, 1998) en el cual se busca una relación, expresada como una ecuación matemática, entre diferentes parámetros que se presuponen relacionados (Aykrod, 1997; Irurita, 2014).

#### 6.3.1.1.2. Variables discretas o numéricas discontinuas

Son aquellas que toman valores aislados dentro de un número finito de categorías. No puede tomar cualquier valor, sino que solo puede tomar aquellos valores que pertenezcan a un conjunto concreto. En el caso de las

variables numéricas discontinuas, los conjuntos son numéricos y la variable no puede tomar ningún valor intermedio (Madrigal, 1998).

En Antropología Forense, los métodos que hacen uso de las variables discretas son aquellos que categorizan un parámetro según los morfotipos disponibles. Por ejemplo, estos métodos se usan en la estimación de la edad según si se ha producido o no un proceso concreto de desarrollo, como puede ser el cierre de suturas o el proceso de fusión de las epífisis.

#### 6.3.1.2. Variables definidas en el sacro

Las dimensiones sacras se miden, generalmente, diferenciando el sacro en sus cuatro posiciones anatómicas. Las definiciones de las medidas que se consideraron son:

1. Anchura máxima del conducto sacro en S1: Anchura máxima establecida entre ambos puntos de unión del cuerpo y las apófisis transversas de S1 dentro del canal.
2. Anchura máxima del cuerpo superior: Anchura máxima entre los puntos más laterales de la cara articular del cuerpo de S1.

3. Profundidad máxima de cuerpo superior: Distancia máxima entre los puntos establecidos en la línea central anteroposterior en la cara articular del cuerpo de S1.

4. Anchura máxima de la cresta transversa superior: Distancia máxima de la cresta transversa de unión entre S1 y S2.

5. Anchura máxima de la cresta transversa medio-superior: Distancia máxima de la cresta transversa de unión entre S2 y S3.

6. Anchura máxima de la cresta transversa medio-inferior: Distancia máxima de la cresta transversa de unión entre S3 y S4.

7. Anchura máxima de la cresta transversa inferior: Distancia máxima de la cresta transversa de unión entre S4 y S5.

8. Longitud máxima de la cresta lateral: Longitud máxima desde el extremo superior de la apófisis transversa de S1 hasta el extremo inferior de S5 (continuando la cresta por las tuberosidades sacras).

9. Cuerda de cresta lateral: Cuerda desde el extremo superior de la apófisis transversa de S1 hasta el extremo inferior de S5 (continuando la cresta por las tuberosidades sacras).

10. Anchura máxima del sacro: Distancia entre los dos puntos más laterales de las alas.

11. Longitud máxima de sacro: Longitud desde el punto medio superior del promontorio hasta el ápex del sacro, tomada en el plano sagital.

12. Cuerda anterior: Cuerda medida a través de la línea media en la superficie de la cara anterior, desde el promontorio hasta el ápex.

13. Anchura del ala sacra: Distancia entre el punto medio más lateral del cuerpo de S1 hasta el punto más lateral del ala.

14. Anchura del hiato sacro: Anchura entre los puntos más laterales del canal medular dentro del hiato sacro.

15. Altura de la carilla articular: Distancia entre el punto más alto y el más bajo de la carilla articular de la apófisis articular.

16. Anchura de la carilla articular: Anchura entre los puntos más laterales de la carilla de la apófisis articular.

17. Altura de faceta auricular izquierda: Distancia entre los puntos superior e inferior de la faceta auricular tomada en posición anatómica.

Al contar lateralidad de la estructura ósea, aumentaron hasta un total de 23 medidas. Todas ellas se midieron con un calibre digital con una precisión de 0,01 mm. y una cinta métrica en aquellas que, por definición, lo requerían.

### 6.3.2. Codificación de los datos

Cada una de las diferentes medidas fue codificada mediante el uso de las siglas de la variable métrica utilizada.

Se añadía una dimensión más diferenciando la lateralidad, en el caso de aquellas medidas donde fuera necesario.

- I: Izquierda

- D: Derecha

Tabla 6.1. Codificación de las medidas consideradas en un comienzo. Se incluye la lateralidad en aquellas que es posible diferenciarla.

| Medidas                                  | Siglas |
|--|--------|
| Anchura máxima foramen medular del sacro | ANF    |
| Anchura máxima superior del cuerpo       | ANSC   |
| Profundidad máxima superior del cuerpo   | PSC    |
| Anchura Cresta transversa superior       | CTS    |
| Anchura Cresta transversa medio-superior | CTMS   |
| Anchura Cresta transversa medio-inferior | CTMI   |
| Anchura Cresta transversa inferior       | CTI    |
| Cresta lateral izquierda                 | CLI    |
| Cuerda Cresta lateral izquierda          | CCLI   |
| Cresta lateral derecha                   | CLD    |
| Cuerda Cresta lateral derecha            | CCLD   |
| Ancho máximo del sacro                   | ANM    |
| Longitud máxima del sacro                | LM     |
| Cuerda Anterior                          | CUA    |
| Anchura ala izquierda                    | ANAI   |
| Anchura ala derecho                      | ANAD   |
| Ancho Hiato sacro                        | ANH    |

Tabla 6.1. Codificación de las medidas consideradas en un comienzo. Se incluye la lateralidad en aquellas que es posible diferenciarla (cont.).

| Medidas   | Siglas |
|---|--------|
| Altura máxima carilla articular izquierda superior  | ACSI   |
| Anchura máxima carilla articular izquierda superior | ANCSI  |
| Altura máxima carilla articular derecha superior    | ACSD   |
| Anchura máxima carilla articular derecha superior   | ANCSD  |
| Altura máxima carilla articular lateral izquierda   | ACLI   |
| Altura máxima carilla articular lateral derecha     | ACLD   |

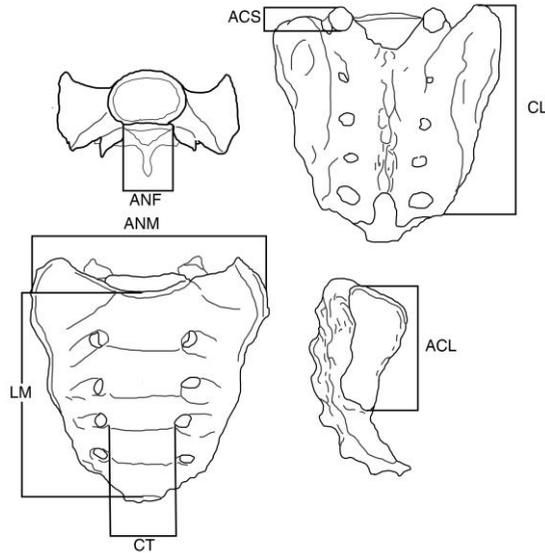


Figura 6.2. Representación gráfica de las medidas en el sacro.

### 6.3.3. Tratamiento estadístico.

Todo el tratamiento estadístico que se describe en este apartado fue realizado con el paquete estadístico IBM SPSS 21.0.

#### 6.3.3.1. Composición y análisis descriptivo de la muestra.

La muestra utilizada en esta parte del presente trabajo pertenece a la colección del Cementerio de San José de Granada. La muestra se formó en base a la presencia de sacro y a los factores limitantes ya descritos en el apartado anterior.

Con el fin de minimizar el volumen de datos, el análisis descriptivo se detalló tras haber realizado el análisis de reproducibilidad y concordancia de las medidas. Dicho análisis descriptivo incluyó el tamaño muestral, la media, la desviación estándar y los valores mínimo y máximo. Todos estos datos nos permiten detectar posibles errores cometidos en la recogida o la elaboración de la base de datos.

#### 6.3.3.2. Análisis de reproducibilidad y de concordancia

El análisis de la reproducibilidad de las medidas se realizó tomando las medidas en una serie aleatoria de individuos. Para ello, se ha de tener en consideración que algunas características de los individuos pueden variar, o incluso la variación del instrumento de medida.

Cuanto mayor tiempo transcurra entre las sesiones de medida mayor probabilidad existe de que haya ocurrido algunas de las variaciones. Sin embargo, este problema se subsana realizando las sesiones de medidas sin demasiado intervalo de tiempo entre ellas pese a que el resultado pueda verse afectado por el aprendizaje adquirido la primera vez (Argimon y Jiménez, 2004).

Para la evaluación de la reproducibilidad y concordancia en este estudio se tomaron las medidas de una serie de  $n$  individuos aleatoria (28 individuos) en dos sesiones de mediciones, separadas por un intervalo de

tiempo de mínimo dos semanas. Se consideró este periodo de tiempo ya que es suficientemente corto como para que no se vieran alteradas las características de la estructura y suficientemente largo como para que la segunda sesión de medidas no estuviera significativamente influenciada por el aprendizaje adquirido.

El observador principal instruyó brevemente al segundo observador el cual no tenía entrenamiento previo en la toma de medidas de la estructura ósea a estudiar. La metodología se siguió de la misma forma para ambos análisis de error –interobservador e intraobservador-.

Dicha evaluación se realizó mediante el cálculo del coeficiente de correlación de concordancia de Lin (CCC; Lin, 1989, 200). El CCC está definido por una ecuación que combina una medida de precisión – representada por el coeficiente de correlación- y con una medida de exactitud –representada por el coeficiente de corrección de sesgo-.

Cuando se plantea una investigación en la que las variables son métricas como, por ejemplo, puede ser la longitud máxima del sacro, se realiza un cálculo del error para variables cuantitativas, siendo altamente recomendado el modelo propuesto por Lin (1989, 2000; visto en Viciano 2012): el Coeficiente de Correlación de Concordancia (CCC).

Si se representaran gráficamente los valores obtenidos por cada investigador y se enfrentaran entre sí, se evaluaría el grado en el que los

pares de observaciones caen sobre una línea que parte desde el origen y tiene pendiente igual a 1.

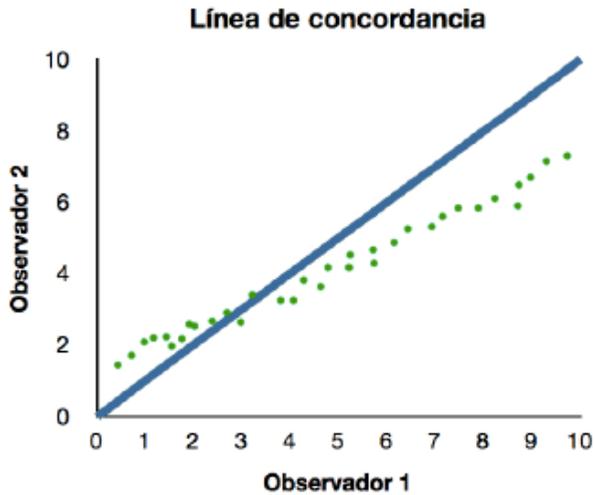


Figura 6.3. Ejemplo hipotético de línea de concordancia (Tomado de Irurita, 2014).

En un caso de correlación perfecta, los valores de ambos observadores serían iguales y todos los puntos coincidirían con la línea de concordancia y el CCC tendría un valor de 1. La fórmula que se aplica para calcular el CCC es:

$$CCC = \frac{2\sigma_{12}}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + (\mu_1 - \mu_2)^2}$$

donde:

- $\sigma_{12}$  es la covarianza del observador 1 y del observador 2
- $\sigma_1^2$  es la desviación estándar del observador 1
- $\sigma_2^2$  es la desviación estándar del observador 2
- $\mu_1$  es el promedio de las mediciones del observador 1
- $\mu_2$  es el promedio de las mediciones del observador 2

El rango de valores posibles para este coeficiente abarca de  $< 0.90$  a 1, teniendo una interpretación de calidad en función del valor obtenido para cada comparación:

| Valor de CCC           | Interpretación |
|------------------------|----------------|
| $CCC < 0.90$           | Pobre          |
| $0.90 \leq CCC < 0.95$ | Moderado       |
| $0.95 \leq CCC < 0.99$ | Bueno          |
| $0.99 \leq CCC < 1$    | Casi Perfecto  |

Figura 6.4. Interpretación de los valores del CCC en la correlación de dos variables cualitativas según McBride (2005, visto en Viciano 2012).

Los parámetros calculados finalmente fueron: el promedio conjunto de medidas repetidas –primera y segunda sesión en el caso del error intraobservador y las mediciones de ambos observadores en el caso del error interobservador-, la desviación estándar del conjunto de las mediciones, la diferencia del promedio, el valor de la covarianza, el coeficiente de correlación momento-producto de Pearson, el coeficiente de sesgo y, finalmente, el coeficiente de correlación de concordancia.

Este coeficiente aumenta su valor en función de: (i) la cercanía del eje principal o la pendiente de la curva de regresión de las parejas de datos obtenidos en la línea perfecta de concordancia que permite evaluar la exactitud de los datos obtenidos, y (ii) la dispersión alrededor de la línea de menor ajuste –línea de regresión de las parejas de datos obtenidos– siendo el reflejo de la precisión de las mediciones obtenidas, correspondiéndose al coeficiente de correlación de Pearson.

Por otra parte, este método permite analizar visualmente cuánto se desvían las diferencias del conjunto de medidas repetidas respecto a una línea a partir del origen y a  $45^\circ$  en un plano cartesiano, que se corresponde con la línea de perfecta concordancia. Por tanto, se realizaron los gráficos para cada una de las variables definidas en un comienzo.

Una vez realizado el análisis de reproducibilidad y concordancia, se seleccionaron aquellas medidas cuyo resultado fue concordante y se encontraba en valores superiores a 0.90 –de moderado en adelante-.

### 6.3.3.3. Análisis de Normalidad y homocedasticidad

Una vez descartadas aquellas variables que resultaron no reproducibles y/o concordantes, se realizó el análisis del dimorfismo sexual – uno de los objetivos principales de este trabajo- con un test de comparación de medias para muestras independientes: la prueba de la t de Student.

La aplicación de la t de Student se realizó ya que la muestra cumplía los requisitos de normalidad y homocedasticidad. Este procedimiento estadístico, además, se ha llevado a cabo ya que el sexo de los individuos es conocido.

La prueba de Levene para la igualdad de varianzas nos indica si se puede, o no, suponer varianzas iguales en base al nivel de significación ( $p > 0.05$ ). En el caso de asumir varianzas iguales, se observó el nivel de significación bilateral el cual, si es menor a 0.05 ( $p < 0.05$ ) implica que las variables muestras diferencias para ambos grupos.

Todo ello nos llevó a comprobar si existían, o no diferencias significativas entre las medias de las variables para los ambos grupos que se divide la muestra.

#### 6.3.3.4. Análisis de regresión logística binaria

Por último, con las medidas que mostraron diferencias significativas, se realizó un análisis de regresión logística binaria con la finalidad de poder establecer unas fórmulas que, aplicadas a poblaciones de características similares permitan separar a los individuos según el sexo al que pertenezcan.

El análisis de regresión permite al investigador: (i) conocer la relación o no entre las variables estudiadas; (ii) conocer, en caso existente, la naturaleza de esa relación (lineal, exponencial, logística, etc.); y (iii) desarrollar un modelo que permita predecir una de las variables con relación a la otra (Martin, 1989).

En este tipo de análisis se pueden distinguir dos tipos de variables:

- Variables independientes: Son aquellas variables que son manipuladas por el investigador. En el campo de la Antropología, son aquellas que cuantifican un rasgo concreto e infiere el efecto que tiene sobre la segunda variable.

- Variables dependientes: Son aquellas que no se manipulan, sino que solamente se observan. Cuando se modifican estas variables se observan los cambios que provocan en las variables independientes. En el campo de la Antropología, esto se ilustra a través de los modelos

predictivos en los cuales se estima la variable dependiente mediante un valor de la variable independiente.

En el presente trabajo, la variable dependiente es el sexo y la independiente es una medida tomada del hueso sacro.

Según el número de variables que intervengan en los estudios, la regresión se puede clasificar en:

-Simple (Univariado): Este sistema hace uso de dos variables entre las que se incluyen la independiente y la dependiente.

-Múltiple (Multivariado): Este sistema hace uso de una variable dependiente y varias independientes. El sistema de regresión múltiple se utiliza cuando la incorporación de cada una de las variables independientes implica una mejora significativa en cuanto al ajuste de la función a la estimación de la variable dependiente (el sexo, en el caso de este trabajo).

Este método estadístico tiene el objetivo de explicar la probabilidad de que ocurra un suceso en cuestión según ciertas variables influyentes sobre dicho suceso, es decir, clasifica a los individuos dentro de unos grupos preestablecidos (masculino y femenino) según una serie de observaciones de las variables independientes, estableciendo fórmulas que permiten hacer predicciones futuras (Bisquerra, 1989).

El procedimiento para llevar a cabo este análisis es mediante una regresión logística (RL) binaria multivariante. Las ventajas que muestra este tipo de análisis multivariante, muy empleado en Ciencias de la Vida, son:

- Permite la introducción de variables cuantitativas o categóricas como variables predictoras del fenómeno.
- Mediante coeficientes de regresión de las variables independientes utilizadas en el modelo, se permite obtener la *Odds Ratio* (OR) correspondiente al riesgo o probabilidad de tener el fenómeno estudiado.
- En el caso del presente estudio, se trabaja con una variable dependiente dicotómica, por lo que la OR es la probabilidad de los sujetos de la muestra a presentar el rasgo que se está analizando. En nuestro caso, el sexo femenino –al estar codificado como 1-.
- Generalmente la variable dependiente; es decir, la variable a modelizar, es categórica y, habitualmente dicotómica -explicando el nombre de regresión logística binaria. Por tanto, permite una clasificación sencilla de los individuos por su simple representación del fenómeno estudiado -el sexo en nuestro caso-.

La regresión logística obtiene la probabilidad ( $p$ ) de que un individuo según los valores de ciertas variables explicativas ( $n$  variables; designadas por  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ) presente el rasgo estudiado. Esta probabilidad, mediante una transformación logarítmica de la ecuación

(función logística, llamada *logit* en inglés) se convierte en lo que se conoce como *odds*.

$$P(Y = 1) = \frac{1}{1 + \exp^{-(\alpha - \beta_1 X_1 - \beta_2 X_2 - \dots - \beta_n X_n)}}$$

donde:

- $\alpha$  es la constante
- $\beta$  es el cociente
- $X$  es la variable explicativa
- $\exp$  implica la función exponencial la cual es una expresión simplificada resultante de elevar el número  $e$  (constante de Euler) a la potencia contenida dentro del paréntesis.

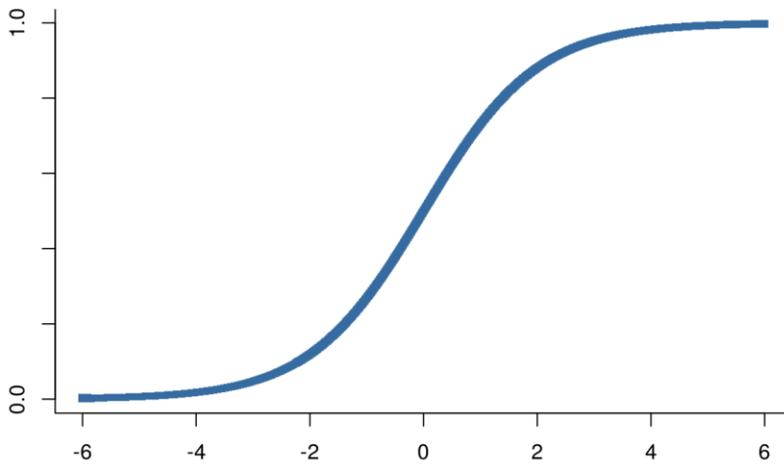


Figura 6.5. Representación gráfica de una función logística binaria.

Para una mayor aplicabilidad y un análisis más completo, se realizaron fórmulas de regresión para cada una de las variables analizadas de forma individual.

Posteriormente se analizaron todas las variables en conjunto con el método *stepwise* donde, se utilizará la prueba de la Razón de Verosimilitud para comprobar las covariables a incluir o excluir del modelo. De esta forma, se asegura que las variables fueron incluidas en el estudio en base a su poder discriminante. (Aguayo, 2007)

En ambos casos, para la inclusión de las variables en la fórmula se utilizaron los criterios por defecto que ofrece el paquete estadístico: probabilidad de entrada para el método por pasos de 0.05, probabilidad de salida para el método por pasos de 0.10, un número de 20 iteraciones máximas y el punto de corte establecido en el 0.5.

En la práctica, cuando el resultado final es superior al punto de corte, implica una probabilidad mayor de que el individuo presente dicha característica, en nuestro caso, ser femenino. Si ese resultado es inferior al punto de corte, y se aproxima al 0, implica una mayor probabilidad de ser masculino. De este modo, la probabilidad de ser hombre se calcularía como  $pm = 1 - pf$ .

Finalmente, se realizó una ponderación por sexo de los resultados con Microsoft® Excel 2011 para Mac. De esta forma, se consiguen eliminar los posibles errores causados por la diferente distribución del sexo de la muestra (Irurita, 2017). Para asegurar esta homogeneidad, se tiene en cuenta el porcentaje de individuos que incluye la fórmula – masculinos o femeninos-, se asocia con el porcentaje de clasificación correcta que calcula el paquete estadístico para dicha fórmula y finalmente se considera el porcentaje de individuos como la mitad de la muestra (50%).

$$\% \text{ ponderado} = \frac{\% \text{ de clasificación calculado} \times 0.5}{\% \text{ de individuos de un grupo incluidos en la fórmula}}$$

## 6.4. Análisis de la curvatura sacra mediante morfometría geométrica

6.4.1. Introducción a la Morfometría: Antecedentes al estudio de la representación humana.

Las proporciones de la figura humana y su forma ha sido un tema de interés desde las civilizaciones más tempranas de la humanidad. Generalmente la representación de la figura de forma fiel se ha utilizado con un sentido estético a lo largo de las distintas civilizaciones. Desde el Antiguo Egipto, las representaciones de las extremidades se realizaban mediante cuadrículas y proporciones estandarizadas y eran las representaciones de la cabeza las que incluían alguna particularidad.

En este sistema de proporciones o canon egipcio basado en antropometría, se determina que el dedo humano estaría contenido 19 veces y media en la altura total del cuerpo, haciendo que las relaciones de las partes del cuerpo sean siempre idénticas, opuesto a los que ocurre en un sistema de perspectivas (Tefnin, 2000).

Tras esto y ya en la Grecia Clásica llegó el canon de Policleto, que él mismo aplicó en su escultura del Doríforo. Este canon determinaba que la palma de la mano debía de ser la medida común. Esta representación geométrica se llegó a instaurar como un modelo anatómico ideal para el arte europeo, ya que se veía como un componente fundamental de la armonía y

la simetría. Tras Policleto, sería Lisipo el que reformularía el canon y aumentaría el sistema de proporciones a siete cabezas y media.

En Roma, fue Vitruvio Polion, quien basándose en el tratado greco-romano, propuso la conocida proporción áurea, una fórmula matemática para la división del espacio dentro de un dibujo. Por otro lado, la proporción, las ideas de simetría y armonía fueron de nuevo temas de interés en el Renacimiento, donde los humanistas desarrollaron de nuevo unos diferentes cánones de proporciones para representar la realidad del cuerpo humano.

Entre ellos, destacan Alberto Durer (1471-1528) y Leonardo Da Vinci (1452-1519) por el uso de cuadrículas para representar y copiar científicamente lo que pintaban. En concreto, merece especial atención el famoso dibujo del “Hombre Vitruviano” de Da Vinci; dibujo considerado como un precedente del estudio del análisis geométrico con el fin de estudiar la anatomía humana.

Posteriormente, ya en la Edad Moderna (siglo XVII), el estudio de la forma humana se desarrollaría con la Geometría de Descartes (1596-1650) quién introdujo el álgebra en la geometría. Este método hace uso del sistema Cartesiano, en el que en un plano se trazan dos rectas (una horizontal y otra vertical) para así situar un punto en el plano observando las distancias que lo separan de los ejes.

Desde entonces, el uso de la proporción en el Arte se pudo aplicar también en la Medicina y la Biología. Karl Pearson (1857-1936) y Francis Galton (1822-1911) fueron los primeros biométricos que utilizaron estos análisis en los organismos.

Fue R. A. Fisher (1890-1962) el considerado padre de la biometría moderna por trabajos en los que se incluían métodos estadísticos como el coeficiente de correlación de Pearson (1985), el análisis de la varianza (Fisher, 1935). Estos nuevos estudios morfológicos tomaron los valores medios de uno o varios rasgos medibles; es decir, incluyeron una descripción cuantitativa de la forma y análisis estadísticos para así ser capaces de describir patrones de variación intra e intergrupales, dejando atrás el sistema de descripción basado en tipos y especies y dando paso al origen de la morfometría moderna (Adams et al., 2004).

Durante los años sesenta y setenta, en el siglo XX, la Biometría se vio influenciada por la integración de la estadística multivariante, permitiendo explicar patrones de variación de la forma entre los distintos grupos. Esta técnica es lo que ahora se conoce como morfometría tradicional, o morfometría multivariante.

Sin embargo, aunque la morfometría contaba con un alto rigor científico, debido al uso de la estadística multivariante y de la morfología cuantitativa, había muchas dificultades que impedían el abordaje objetivo de los estudios. Por ejemplo:

1. La falta de consenso en la metodología empleada para la corrección y la variación del tamaño, dando resultados diferentes entre los distintos estudios.

2. La dificultad en la evaluación de la homología entre las distancias lineales (Rohlf y Marcus, 1993).

3. La existencia de algunas medidas de distancia que pueden obtenerse a partir de dos formas diferentes. La longitud máxima y la anchura máxima podrían medirse tanto en un óvalo como en una lágrima, dando los mismos valores, pero siendo muy distintos en forma (Adams et al., 2004).

4. El análisis realizado en morfometría tradicional no permite generar representaciones gráficas de la forma de los organismos a partir de las distancias lineales (Rohlf y Marcus, 1993).

El uso de los métodos tradicionales hace que la información recogida se limite a unas distancias lineales, perdiendo así la relación geométrica entre las variables: no hace posible la representación gráfica de las formas ni la relación entre sus variaciones. Además, estos puntos, distancias o ángulos no permiten la “reconstrucción” de la forma geométrica (Richtsmeier et al., 2002)

Gracias a los trabajos de Kendall (1981, 1984) y Bookstein (1986, 1991), estas dificultades se vieron paliadas por el nacimiento de nuevos métodos para cuantificar los datos correspondientes a la geometría de las formas morfológicas. En ellos, las medidas lineales unidimensionales se sustituyen por un sistema de coordenadas representadas en un espacio bi o tridimensional a través de conjuntos de puntos de referencia denominados *landmarks*. Por ello, los resultados de los análisis multivariantes podían representarse en gráficos de dispersión estadística; a esta nueva línea se la denominó “Morfometría Geométrica” y fue caracterizada como una “revolución” por Rohlf y Marcus en 1993.

La morfometría geométrica se define como el conjunto de técnicas que permite la descripción cuantitativa, análisis e interpretación de la varianza y covarianza de la forma de los organismos mediante la unión de la Geometría, la Biología y la Estadística (Bookstein 1991; Webster y Sheets, 2010).

Dichos métodos morfométricos proponen el estudio de los cambios en el tamaño y la forma de los organismos biológicos a partir del desplazamiento bidimensional (2D) o tridimensional (3D) de un conjunto de puntos de referencia (*landmarks*), manteniendo siempre toda la información geométrica contenida en todo el proceso, ayudando a la “reconstrucción” de la forma, el tamaño y la relación espacial de las estructuras morfológicas entre sí dentro del espécimen estudiado.

El análisis morfogeométrico consta de tres fases:

- Análisis de datos
- Obtención de forma
- Análisis de la varianza y covarianza de la forma mediante estadística multivariante.

#### 6.4.2. Análisis de datos (*Data acquisition*)

Los primeros métodos que se desarrollaron fueron los análisis de contornos, que consistían en la digitalización de puntos a lo largo de un contorno, para poder evaluar y comparar las curvas a través del análisis multivariado (Adams et al., 2004)

Los estudios en morfometría geométrica consisten en el análisis mediante *landmarks*. Éstos posibilitan la comparación de puntos homólogos y repetibles en estructuras biológicas entre los especímenes de la población estudiada, ya bien de una forma localizada o general (Rohlf y Marcus 1993).

#### 6.4.2.1. *Landmarks*.

Los *landmarks*, entendidos como los puntos de referencia, tienen un papel fundamental en la morfometría geométrica. Cada *landmarks* se registra en términos de coordenadas cartesianas: cada punto viene definido por las distancias que separan al punto de cada uno de los ejes X, Y en un espacio bidimensional o los ejes X, Y, Z en un espacio tridimensional.

La selección de los *landmarks* es una etapa importante en un análisis de morfometría geométrica ya que ese conjunto de coordenadas da forma a los datos primarios de los que depende la confiabilidad de los resultados y la cantidad de información recogida. A cada *landmark* se le asigna un número que se repite en toda la muestra para que así puedan ser comparados entre sí, por ejemplo, si el *landmark* 1 se sitúa en el ápex del sacro en el primer sacro, el *landmark* 1 se ha de situar siempre en el ápex del resto de sacros de la muestra (Toro et al., 2010).

##### 6.4.2.1.1 Características de los *landmarks*

Generalmente los *landmarks* agrupan una serie de criterios adecuando su elección como herramienta de investigación para analizar las formas (Zelditch et al., 2012):

- a) Homología: este concepto es de suma importancia para la elección de los puntos de referencia. Se define como estructura

homóloga aquella que es reconocible y distinta al resto de estructuras en todos los especímenes del grupo (Toro et al., 2010). De esta forma, cuando se sitúan puntos en las mencionadas estructuras, éstos resultarán reconocibles, homólogos entre sí y permitirán interpretar la variación con significancia biológica. Por el contrario, en determinadas ocasiones es necesario recurrir a un concepto más funcional de homología ya que puede no haber correspondencia real entre estructuras, pero sí entre puntos; este caso se encuentra en los *semilandmarks*: puntos que ayudan al estudio de regiones que carecen de *landmarks* homólogos.

b) Consistencia en la posición relativa de los *landmarks*, debiendo ser la misma entre todos los especímenes de estudio. Si hubiera variación en la posición de puntos de referencia, se alteraría la topología resultando en una metodología poco apropiada para el estudio de la forma. Por ello, los análisis de morfometría geométrica no serían aplicables si la diferencia entre las estructuras a estudiar fuera muy distintas entre sí. (Zelditch et al., 2012)

c) Cobertura adecuada de la forma: los puntos de referencia han de representar de manera rigurosa la forma de estudio, por lo que la selección del número adecuado de los *landmarks* ha de ser precisa. Un número exagerado puede resultar en un análisis estadístico poco fiable y, a su vez, un número insuficiente puede resultar en pérdida de información (Toro et al., 2010).

d) Repetibilidad: este concepto hace referencia a la facilidad de identificación y localización de los *landmarks*. Si la localización del *landmark*, o conjunto de *landmarks*, no tuviera una fácil identificación derivaría en un resultado negativo en los análisis de error intra e interobservador.

e) Coplanariedad: hace referencia a la dificultad de realización de los análisis en dos o tres dimensiones. Por tanto, se ha de tener especial precaución dada la posibilidad de distorsión del análisis de la forma en el momento de proyectar una estructura tridimensional en un plano bidimensional (Zelditch et al., 2004).

#### 6.4.2.1.2. Tipos de *Landmarks* (LM).

Bookstein en 1991 presentó una clasificación de los *landmarks*, que actualmente es la más utilizada. Recientemente fue revisada en 2011 por Bookstein y Weber para incorporar así los *semilandmarks*.

a) Tipo I: Estos *landmarks* se registran en la yuxtaposición exacta de estructuras o inserciones de curvas. Corresponden a puntos matemáticos cuya supuesta homología se reafirma por una sólida evidencia entre individuos (Cooke y Terhune, 2015).

b) Tipo II: Estos *landmarks* se localizan en los puntos de máxima curvatura o en cualquier otro punto anatómico reconocible y donde existe una implicación de fuerzas biomecánicas. En general, vienen definidos por una estructura biológica que está en una región determinada, pero que suele ocupar un área mayor a ese punto (Lele y Richtmeier, 2001).

c) Tipo III: corresponden a los *landmarks* situados en puntos extremos y cuya localización se establece por estructuras distantes. Este tipo de *landmarks* necesita la mención de otra estructura para explicar su localización y se caracteriza por tener al menos una coordenada deficiente (Bookstein, 1991).

d) *Semilandmarks*: En determinadas ocasiones los *landmarks* son insuficientes debido a la anatomía de la estructura y no se pueden definir con precisión, ni se puede determinar su posición espacial. Este problema es frecuente en la estructura de morfología curva. Los *semilandmarks* corresponderían a aquellos puntos que se sitúan en una línea a lo largo de dicha estructura curva (Slice, 2007). El término *semilandmark* fue introducido por Bookstein en 1997 para describir el conjunto de puntos localizados de forma arbitraria a lo largo de la curva y sin tantos grados de libertad como el número de coordenadas que definen su localización. Debido al menor grado de libertad con respecto a los *landmark*, los *semilandmark* no pueden ser analizados de forma equivalente por contener menor información (Zelditch et al., 2002). Al igual que los *landmark*, se ha de contar con el mismo número de *semilandmarks* y éstos han de ser equidistantes (Gunz y Mitteroecker,

2013). No obstante, el número mínimo de *semilandmarks* a utilizar varía siendo directamente proporcional según la complejidad de la forma.

#### 6.4.2.2. Toma de Fotografías

El análisis de morfometría geométrica del presente trabajo se ha llevado a cabo sobre fotografías en dos dimensiones, lo que supone una serie de ventajas y desventajas explicadas en el capítulo de introducción de la morfometría geométrica.

Las fotografías fueron tomadas con una cámara de fotografía digital Canon EOS 700D de 18.0 MPixel (Canon Inc., Japón) y un objetivo EF-S 18-55mm IS STM para Canon (Canon Inc., Japón).

Con el fin de obtener la mayor profundidad de campo y que el sacro quedara bien enfocado, las fotografías se han tomado con un valor de diafragma de  $f$  9.0 y a 0.6 m. Además, para evitar la distorsión que se produce en los extremos de la imagen, el sacro se ha colocado en el centro del encuadre.

Las fotografías se tomaron en formato Raw pudiendo realizar modificaciones posteriores si fuera necesario. Este formato presenta la ventaja de que la fotografía es tomada en *crudo*, es decir, toma la fotografía pero deja abiertos los valores como la exposición, el balance de blancos o la saturación, entre otros. Esto permite añadir ventajas a la imagen que

repercuten positivamente en el análisis morfométrico al permitir una mayor precisión en la colocación de los *landmarks*.

Las fotografías se tomaron siguiendo una serie de pautas que aseguran una mayor precisión para la posterior situación de *landmarks*:

La cámara se conectó a un ordenador, lo cual permitía una previsualización de la imagen a tiempo real, además de aumentar el tamaño de la pantalla, facilitando la detección de errores en la colocación del sacro.

Por otro lado, se colocó una luz fija para conseguir una óptima nivelación de la cámara, además de un testigo métrico dentro de las mismas que sirve de referencia.

Se utilizó plastilina para una correcta colocación y orientación del sacro en la posición establecida: lateral izquierdo siguiendo las recomendaciones de López-Lázaro (2016), Plochocki (2011) y Rusk y colaboradores (2011). En esta posición se pueden alinear las facetas auriculares de las caras laterales y se dibuja un recorrido que sirve de referencia para analizar la curvatura sacra. Además, la parte craneal del sacro quedó en la parte inferior con el fin de alinear el cuerpo de S1.

La comparación apropiada de *landmarks* homólogos depende de la adopción de un sistema común, de uso previo a la toma de las fotografías,

para conseguir una buena orientación del sacro. Sin la correcta orientación y colocación del sacro, los *landmarks* no podrían ser comparados.



Figura 6.6. Fotografía del sacro perteneciente al individuo G-520 de la colección de San José.

#### 6.4.2.3. Localización de *Landmarks*

Siguiendo la línea de referencia formada por la faceta auricular hasta la parte lateral izquierda del hiato sacro, se han colocado los *landmarks* y *semilandmarks* dibujando así la curvatura sacra.

Se han situado 3 *landmarks*:

1. El primero se situó en la parte más ventral de la faceta auricular izquierda
2. El segundo *landmark* se situó en la parte más dorsal de la curva, coincidiendo con el ángulo de esta
3. El tercer y último *landmark* se situó en la parte lateral izquierda del ápex de la 5ª vértebra sacra.

A estos se suman 16 *semilandmarks*, todos ellos equidistantes entre los *landmarks* 1 y 2, y 13 *semilandmark*, equidistantes entre los *landmarks* 2 y 3, cubriendo la morfología de la curvatura sacra en lateralidad izquierda.

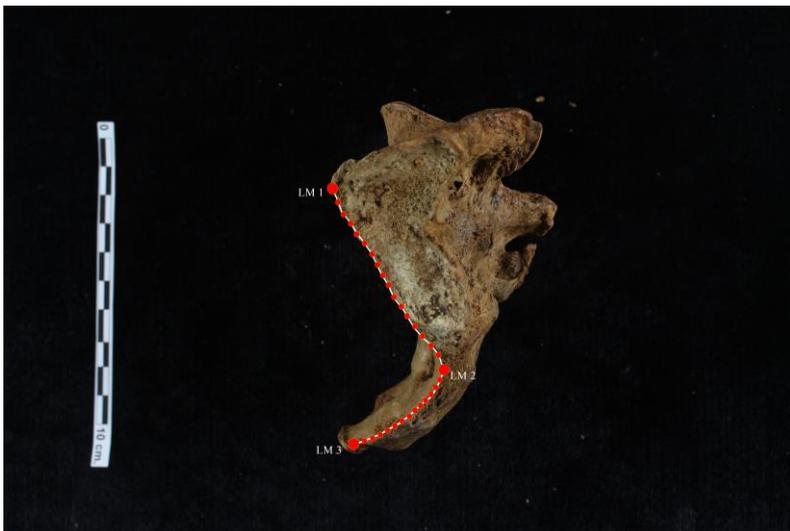


Figura 6.7. Fotografía con la colocación de *landmarks* y *semilandmarks* dibujando la curva. Para una mejor comprensión anatómica, la fotografía se giró 180°.

#### 6.4.2.4. Digitalización de los datos

El primer paso tras la toma de las fotografías fue el revelado de los archivos Raw mediante la utilización de Adobe Photoshop Lightroom 5.2®.

La digitalización de los *landmarks* y los *semilandmarks* se realizó con el programa TPSdig2 (Rohlf, 2005). Los *landmarks* se situaron de forma directa, siempre en el mismo orden, utilizando la herramienta de digitación.

Los *semilandmarks* han de ser convertidos primero en *landmarks* y luego en *semilandmarks*. Para ello, primero se utiliza la herramienta de dibujo de curvas (lápiz). Una vez trazada la curva de forma manual, se ajustan el número de puntos (siempre el mismo número) que se sitúan de forma equidistante entre los *landmarks*. A continuación, mediante el programa TPSUtil (Rohlf, 2004) se transformaron en *landmarks*.

### 6.4.3. Tratamiento estadístico

#### 6.4.3.1. Análisis de error de observación.

En el campo de la morfometría geométrica no se ha conseguido un consenso general entre los investigadores para poder evaluar la fiabilidad en la recogida de los datos a través de *landmarks* y *semilandmarks*. Además, se añade que la toma de datos en el campo de morfometría geométrica se puede ver influenciada por otras posibles y específicas fuentes de error:

1. El estado de conservación de la muestra puede variar la reproducción digital del individuo provocando a su vez variación en la toma de los datos.
2. La reducción de la dimensionalidad de los datos cuando se trabaja en un espacio bidimensional. El error radicaría en un fallo en el alineamiento del individuo en los ejes principales (X, Y) al aplicar la reducción de la tercera dimensión (Z) (Bookstein, 1991).
3. La distorsión óptica de la lente que se utilice para digitalizar las imágenes.

4. La distorsión en la reproducción digital. Esta fuente de variación se da según la herramienta utilizada para el postprocesado de las imágenes (Rohlf, 1990).
  
5. La localización, selección y definición de los *landmarks* y *semilandmarks*.

Las diferentes metodologías propuestas por numerosos investigadores proponen la evaluación del error de medición en morfometría geométrica mediante métodos de superposición de configuraciones de *landmarks*, como puede ser el análisis generalizado de Procrustes (Lockwood et al., 2002); o a través de las distancias euclidianas entre los *landmarks* de una configuración y el centroide (Singleton, 2002); o realizando un proceso de digitalización repetida de *landmarks* y *semilandmarks* con el fin de analizar sus coordenadas en bruto (von Cramon Taubadel et al., 2007).

A causa de la falta de consenso, en el presente trabajo, el error intra- e interobservador en el análisis morfometría geométrica se llevó a cabo mediante la evaluación de las coordenadas en bruto considerando el posible error que puede llegar a producirse en la localización de los *landmarks* y *semilandmarks*. Para ello, se utilizó el Coeficiente de Correlación Intraclase

(ICC), el cual estima el promedio de las correlaciones entre todas las combinaciones posibles entre los pares de observaciones (Shrout y Fleiss, 1979).

Este modelo se utiliza con frecuencia con datos de carácter continuo y fue introducido por Fisher en 1954, reformulando el cociente de correlación de Pearson ( $r$  de Pearson). Tiene la finalidad de evaluar la variabilidad y concordancia entre dos (o más) observaciones a través de la estimación del promedio de correlaciones entre los pares de observaciones de lo que se dispone (Fernández et al., 2003). Además, este modelo también permite analizar la concordancia entre mediciones seleccionadas al azar (Prieto et al., 1998; Ferrante et al. 2009).

El ICC cuenta con distintas variantes de cálculo para su aplicación y por ello, es necesario que los investigadores conozcan las diferencias por las distintas suposiciones en los cálculos provocando una diferencia en la interpretación. Koo y Li (2016) consideran tres aspectos que pueden responder a la elección del método de análisis de fiabilidad:

#### A. Modelo:

A. Unidireccional, efectos aleatorios: cada sujeto se evalúa por un grupo diferente de observadores, seleccionado de forma aleatoria de una población mayor.

B. Bidireccional, efectos aleatorios: Los observadores se eligen al azar. Los individuos son seleccionados de forma aleatoria de una población mayor de observadores con características similares.

C. Bidireccional, efectos combinados: Su utilización se justifica cuando los observadores seleccionados son los únicos interesantes para el estudio. Cada individuo se evalúa por un grupo de observadores que representan a la totalidad de la población.

B. Tipo:

A. Medidas únicas. Son las tomadas por un solo observador como base de la evaluación.

B. Medidas promedio. Son las medidas tomadas por un número definido de investigadores como base de la evaluación.

C. Definición:

A. Acuerdo de consistencia: cuando se considera solo el error aleatorio.

B. Acuerdo absoluto: cuando se consideran tanto el error aleatorio como el sistemático.

Cuando se combinan y seleccionan esas diversas opciones surgen los diferentes modelos matemáticos que se pueden aplicar al ICC.

Sin embargo, y pese a que su buena consideración en la valoración de la reproducibilidad, cuenta con limitaciones para evaluar la concordancia (Cortés-Reyes et al., 2010). El ICC está inversamente relacionado con la variabilidad de las observaciones comparadas; es decir, si hay variables en las que las diferencias entre los individuos son grandes, el ICC dará por defecto una mala correlación (por ejemplo, si se analizara la edad de los individuos, entre jóvenes y seniles las diferencias son muy grandes).

**Fórmulas para calcular el coeficiente de correlación intraclase y equivalencia entre los modelos de Shrout y Fleiss (1979) y McGraw y Wong (1996).**

| Mc Graw y Wong (1996)  | Shrout y Fleiss (1979) <sup>a</sup> | Fórmula <sup>b</sup>  |
|--|-------------------------------------|---|
| Unidireccional, efectos aleatorios, acuerdo absoluto, medida única     | ICC (1,1) <sup>d</sup>              | $\frac{MS_R - MS_W}{MS_R + (k + 1)MS_W}$                            |
| Bi direccional, efectos aleatorios, consistencia, medida única         | -                                   | $\frac{MS_R - MS_E}{MS_R + (k - 1)MS_E}$                            |
| Bi direccional, efectos aleatorios, acuerdo absoluto, medida única     | ICC (2,1)                           | $\frac{MS_R - MS_E}{MS_R + (k - 1)MS_E + \frac{k}{n}(MS_C - MS_E)}$ |
| Bi direccional, efectos mixtos, consistencia, medida única             | ICC (3,1)                           | $\frac{MS_R - MS_E}{MS_R + (k - 1)MS_E}$                            |
| Bi direccional, efectos mixtos, acuerdo absoluto, medida única         | -                                   | $\frac{MS_R - MS_E}{MS_R + (k - 1)MS_E + \frac{k}{n}(MS_C - MS_E)}$ |
| Unidireccional, efectos aleatorios, acuerdo absoluto, medidas promedio | ICC (1,k)                           | $\frac{MS_R - MS_W}{MS_R}$  |
| Bi direccional, efectos aleatorios, consistencia, medidas promedio     | -                                   | $\frac{MS_R - MS_E}{MS_R}$  |
| Bi direccional, efectos aleatorios, acuerdo absoluto, medidas promedio | ICC (2,k)                           | $\frac{MS_R - MS_E}{MS_R + \frac{MS_C - MS_E}{n}}$                  |
| Bi direccional, efectos mixtos, consistencia, medidas promedio         | ICC (3,k)                           | $\frac{MS_R - MS_E}{MS_R}$  |
| Bi direccional, efectos mixtos, acuerdo absoluto, medidas promedio     | -                                   | $\frac{MS_R - MS_E}{MS_R + \frac{MS_C - MS_E}{n}}$                  |

Figura 6.8. Fórmulas para calcular el ICC.

<sup>a</sup>ICC = Coeficiente de correlación intraclase

<sup>b</sup>Las 6 formas definidas por Shrout y Fleiss (1979) son representadas mediante dos números entre paréntesis. El primer número hace referencia al modelo (1, 2 y 3) y el segundo número se refiere al tipo, el cual puede ser de medida única (1) o medida promedio (k).

<sup>c</sup>MS<sub>R</sub> = Cuadrados medios entre sujetos; MS<sub>W</sub> = Cuadrados medios de la fuente residual de la varianza entre sujetos; MS<sub>E</sub> = Cuadrados medios del error; MS<sub>C</sub> = Cuadrados medios del estudio (Modificado de Koo y Li, 2016; tomado de Estévez, 2018).

Para cuantificar la fiabilidad de las observaciones realizadas en el análisis de morfometría geométrica se empleó el coeficiente de correlación intraclass (ICC), que estima el promedio de las correlaciones entre todas las posibles ordenaciones de los pares de observaciones disponibles.

Los resultados de este análisis oscilan entre 0 y 1, siendo 0 la ausencia total de concordancia y 1 la total concordancia entre las observaciones evaluadas. En este trabajo se utilizó la clasificación de Fleiss (1986) para definir el grado de acuerdo, donde:

- $<0.4$  supone un acuerdo pobre
- $0.41 - 0.75$  supone un acuerdo bueno
- $>0.75$  supone un acuerdo excelente

Considerando que se trata de una prueba paramétrica, se hace necesario que la muestra cumpla ciertas asunciones: una distribución normal, igualdad de varianzas e independencia entre los errores de cada observador.

#### 6.4.3.1.1. Error intraobservador

El análisis del error en la localización de los *landmarks* y *semilandmarks* en las imágenes se llevó a cabo mediante una submuestra aleatoria formada por imágenes de diez individuos. En cada una de las

imágenes se localizaron los *landmarks* y *semilandmarks* durante 5 días consecutivos y, tras un descanso de dos días, otros 5 días consecutivos. Con todo ello, se obtuvo el promedio de cada una de las dos fases y a través del programa TPDdig2 (Rohlf, 2005) se obtuvieron las coordenadas.

#### 6.4.3.1.2. Error interobservador

Para el análisis de error interobservador se siguió la misma metodología aplicada en el análisis del error intraobservador.

Se empleó una submuestra aleatoria formada por imágenes de 10 sacros en las cuales se localizaron los *landmarks* y *semilandmarks* de forma independiente por el segundo observador durante 2 sesiones de 5 días consecutivos, con descanso de dos días entre cada sesión. De nuevo, las coordenadas se obtuvieron con el mismo programa con el cual se realizó la localización: TPSdig2 (Rohlf, 2005).

#### 6.4.3.1.3. Análisis de la concordancia de las observaciones

Dado que los datos obtenidos no siguen una distribución normal, para el análisis del error de observación se han tipificado o estandarizado sus valores restándole su media aritmética y dividiendo por su desviación estándar:

$$z_1 = \frac{x_1 - \bar{x}}{\sigma}$$

El resultado consiste en una nueva variable tipificada, representada por la letra  $z$ , con media 0 y desviación estándar 1.

Los resultados de la concordancia se expresan de forma individual para los valores  $x$  e  $y$  de los *landmarks* y de forma conjunta para los valores  $x$  e  $y$  de los *semilandmarks* mediante intervalos con los valores mínimo y máximo obtenidos.

Dicho análisis del coeficiente de correlación intraclase (modelo aleatorio bidireccional, tipo acuerdo absoluto) y la tipificación de las variables se realizó con el paquete estadístico IBM SPSS v21.0 (Corp I.B.M., 2012).

#### 6.4.3.2. Obtención de la *forma*.

Posterior a la digitalización de los *landmarks*, la conversión de la curva en *landmarks* y el análisis del error en las observaciones, se prosiguió con el análisis de la *forma*.

Es la siguiente etapa del análisis morfogeométrico y abarca aquellas técnicas geométricas y estudios estadísticos que se han de realizar para ser

capaces de obtener toda la información cuantitativa de la forma objeto de estudio.

#### 6.4.3.2.1. Definición de forma.

Dado que el progreso de la morfometría geométrica hace uso de una nueva teoría matemática relacionada con la forma y el tamaño, inevitablemente se ha de especificar el significado que adquieren estos conceptos (Zelditch et al., 2012). La forma de un objeto se compone por el tamaño (*Size*) y la forma (*Shape*). El término *shape*, en inglés, podría traducirse como forma, figura o aspecto, por lo que se utilizará en cursiva para referirnos al concepto en un contexto de morfometría geométrica y así diferenciarlo del concepto tradicional de forma. La *forma* define “toda la información geométrica que permanece cuando se eliminan los efectos de traslación, rotación y escala” (Kendall, 1977).

Cuando los *landmarks* no corresponden los unos con los otros, o cuando el *landmark* se analiza de forma individual, el estudio y comparación de *formas* sería imposible. La información de la *forma* va a venir dada por la configuración de un conjunto de puntos de referencia coincidentes entre los especímenes que conformen la población de estudio. Estas configuraciones están comprendidas por el número de *landmarks* (K) y su valor de coordenadas (M) el cual varía de si se trabaja en un plano bidimensional o tridimensional (Zelditch et al., 2004). Por ejemplo, si hubiera 5 *landmarks* con dos valores de coordenadas (X, Y - en un espacio

bidimensional), no implica que tengamos 10 variables a considerar, sino una configuración completa de *landmarks* que se analiza conjuntamente.

#### 6.4.3.2.2. Conceptos de Tamaño y Tamaño del Centroide

En morfometría tradicional, el concepto de tamaño se ve asociado o definido como un área, un volumen, una longitud, un peso o un centroide (Slice, 2005). En morfometría geométrica, para valorar el tamaño se utiliza el centroide: la raíz cuadrada de la suma de las distancias al cuadrado desde el centroide a cada *landmark* (Kendall, 1984). La influencia de la variable tamaño sobre la variación de la muestra es analizable mediante el uso del tamaño del centroide, sin alterar los resultados que atienden a las variables de la forma biológica.

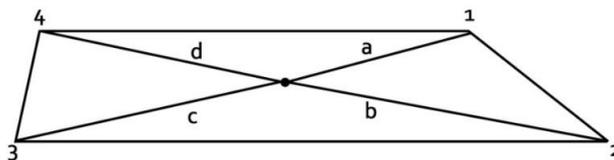


Figura 6.9. Método para estimar tamaño del centroide, debajo ecuación para su cálculo (modificado de Toro et al., 2010).

#### 6.4.3.2.3. Espacios morfogeométricos

Conforme se van eliminando los efectos de traslación, rotación y escala tras el proceso de localización de *landmarks*, el análisis debe transcurrir por los diferentes espacios morfométricos con el fin de llegar a la *forma*.

##### 6.4.3.2.3.1. Espacio de las configuraciones.

Una configuración completa de *landmarks* se ve representada por este espacio. Cada una de las configuraciones de *landmarks* relaciona K cantidades de *landmarks* con M coordenadas (que varía entre dos y tres para los espacios bidimensionales y tridimensionales respectivamente). Así, la matriz de configuraciones de coordenadas cartesianas se conforma de K filas y M columnas.

De esta manera, las *formas* con mayor similitud biológica compartirían la misma configuración de la matriz KM y ocuparían una zona relativamente pequeña de la configuración, puesto que la correspondencia entre sus *landmarks* es muy similar (Zelditch et al., 2012).

En este espacio se eliminan dos de los efectos anteriormente mencionados: el efecto de escala, que se realiza mediante el tamaño

centroide; y el efecto de traslación, que también depende de la posición del centroide en el espacio matemático.

El efecto de escala: La obtención del tamaño centroide va a permitir que éste se escale para llevar varias configuraciones a un tamaño común. De esta forma, la información relacionada con el tamaño va a ser apartada y podría estudiarse de forma aislada. Así, el tamaño del centroide puede ser incluido en el análisis como una variable independiente.

El efecto de traslación: sucede cuando existe un desplazamiento en cualquier dirección con respecto al eje de coordenadas. Dicho efecto se elimina cuando se promedian las coordenadas de los ejes hasta compartir el mismo centroide. Una matriz de configuración está centrada cuando el promedio de todas sus configuraciones es 0.

#### 6.4.3.2.3.2. Espacio preforma o pre-Kendalliano

Es el siguiente espacio una vez eliminados los efectos de traslación y escala. Este espacio consiste en la reducción de las dimensiones, superponiendo los centroides en el origen del sistema de coordenadas ( $x=0$ ,  $y=0$ ) y escaladas a la unidad. Dichas dimensiones quedan reducidas porque se han perdido tres dimensiones: dos por la traslación y una por el escalado, resultando  $KM-(M+1)=KM-M-1$  dimensiones. Por tanto, las configuraciones de *landmarks* bidimensionales tendrán siempre  $2k-3$  dimensiones ( $3K-4$  dimensiones en tridimensionales).

En el espacio preforma se elimina el último efecto, la rotación. Este proceso se localiza a lo largo de un arco circular llamado *fibra* (*fiber* en inglés) que se encuentra en la superficie de la hemiesfera del espacio *preforma*. El objetivo final pretende rotar una matriz de configuraciones hasta que todas las formas se dispongan lo más cerca posible de una forma consenso.

#### 6.4.3.2.3.3. Espacio de la forma

Una vez eliminados todos los efectos o factores no asociados a la forma, la información geométrica restante es lo que se entiende por *forma* y resulta en el espacio de la forma o espacio Kendall. En este espacio varía de nuevo la dimensionalidad, debido a una nueva reducción de sus dimensiones. Al retirar la rotación resulta en  $M(M-1)/2$  dimensiones. En espacios bidimensionales, a las dos restadas por traslación, 1 por escalamiento, se añade 1 restada por rotación quedando  $2K-4$  dimensiones ( $3K-7$  en espacios tridimensionales).

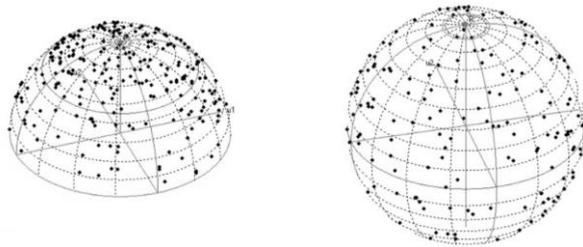


Figura 6.10. Representación gráfica de espacios. A la izquierda, ejemplo de espacio preforma; a la derecha, de espacio de la forma; ambos con 300 triángulos generados de manera aleatoria y uniforme (Modificada de López-Lázaro, 2015).

El espacio de Kendall es una superficie curvada, que viene dado por todas las configuraciones posibles de *landmarks*, y no Euclídea (no lineal). En morfometría tradicional, la metodología de análisis multivariante utiliza espacios lineales no siendo apropiada para el estudio de la forma (Zelditch et al., 2012).

En un caso más simple como es el de los triángulos, el espacio se plasma como la superficie de una esfera bidimensional. Sin embargo, en configuraciones de más de tres *landmarks* este espacio se hace muy complejo. Kendall (1984) estableció que si los vértices de una forma son variables normales esféricas, distribuidas de forma independiente e idéntica, la distribución de la forma es igual en todas las direcciones (Dryden y Mardia, 1998). Para poder analizar estadísticamente las configuraciones se proyectan en una tangente, cuyo punto se corresponde a la forma consenso. Este espacio tangente tiene una geometría Euclídea. Esta representación se

equipara a la proyección de un globo terráqueo sobre un plano, con la distorsión de las formas que puede ocasionar. Las formas proyectadas en el espacio tangente pueden utilizarse para el estudio con métodos de estadística multivariados (Mitteroecker y Gunz, 2009).

Las distancias entre puntos en el espacio de Kendall se conocen como distancias Procrustes (p): distancias geodésicas medidas en radianes (Rolhf, 1998). Ésta se establece como la raíz cuadrada de las sumas al cuadrado de las distancias entre dos configuraciones (Zelditch et al., 2012).

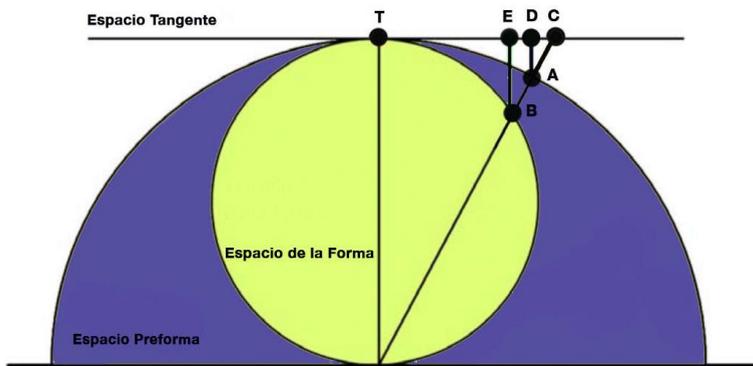


Figura 6.11. Proyección de un punto situado en el espacio de Kendall sobre el espacio tangente. La semiesfera exterior representa las formas escalada a un único centroide; el círculo interior representa la sección de las formas centradas y alineadas. A: Posición de la forma en la semiesfera de la preforma; B: Posición de la forma en el espacio de Kendall; C: Proyección estereográfica de B en el plano tangente; D: proyección ortogonal de A en el plano tangente; E: Proyección ortogonal de B en el plano tangente (Modificada de Zelditch et al., 2012).

#### 6.4.3.2.4. La superposición de procrustes

Existen diversos métodos que permiten el análisis de la variación morfológica: superposición, deformación, análisis de contornos y basados en distancias lineales.

Actualmente, el método más utilizado es el de superposición de Procrustes frente a los anteriormente mencionados. El nombre de Procrustes proviene de la mitología griega en la que un personaje mitológico ataba a sus visitantes a la cama y si les sobresalían las piernas, se las cortaba con la finalidad de minimizar la diferencia de tamaño entre los visitantes y la cama. En el caso del análisis morfométrico también se reducen las diferencias, aunque mantiene la forma en vez de alterarla como hacía Procrustes con sus visitantes (Zelditch et al. 2012).

El método de superposición de Procrustes elimina los efectos de traslación, escala y rotación sin que dichos efectos alteren la forma y se basa en un método generalizado de mínimos cuadrados (*General Least Squares*):

- Fase 1: Con el objetivo de compartir el mismo centroide, las configuraciones de *landmarks* se centran/desplazan en el origen haciendo este centroide el nuevo origen del sistema de coordenadas.
- Fase 2: Las configuraciones de *landmarks* se escalan para que todas tengan el tamaño del centroide (*Centroid Size*), dividiendo cada

coordenada de cada *landmark* entre el centroide de la configuración. De forma generalizada, el valor del centroide se establece como 1 para todas las configuraciones.

- Fase 3: Se elige una configuración de referencia y posteriormente se rota una segunda configuración con la finalidad de minimizar la suma de las distancias al cuadrado entre *landmarks* homólogos entre las formas. Cuando existen más de dos *formas*, éstas se rotan hasta alinearse a la primera para seguidamente calcular la media resultando en la siguiente *forma* de referencia. Este proceso continúa hasta que la nueva *forma* de referencia o *forma* consenso tiene la misma que la previa. Esta media final es la que ayuda a minimizar la distancia media de las *formas* de la de referencia (Zeldicht et al., 2012). Todo este proceso es el que se conoce como Análisis General de Procrustes (GPA) (Rohlf y Slice, 1990) y su ventaja radica en que está muy asentado en la teoría de la forma ya que las configuraciones de *landmarks* pueden ser manipuladas en las tres operaciones descritas sin alterar su *forma*.

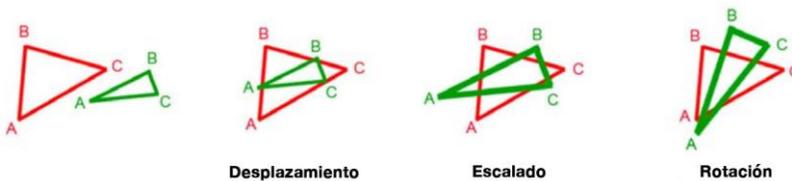


Figura 6.12. Representación esquemática del proceso de Superposición de Procrustes (Modificada de Gómez-Robles, 2010).

Las coordenadas que derivan de este proceso son las conocidas como Coordenadas de *Forma* de Procrustes (*Procrustes Shape Coordinates*). La distancia de Procrustes se define como la distancia euclidiana entre dos conjuntos de estas coordenadas y el tamaño indica la similitud o no en la *forma* entre dos configuraciones de *landmarks*. Todo esto hace que la Superposición de Procrustes, pese a algunas limitaciones, sea uno de los métodos considerado más fiable, desde el punto de vista estadístico, para realizar un análisis de variación de la forma. Este análisis se realizó utilizando el programa CoordGen (Sheet, 2011).

#### 6.4.3.2.5. Deslizamiento de *semilandmarks*.

Los *semilandmarks* no se pueden analizar haciendo uso de los mismos métodos, puesto que poseen una menor cantidad de información. Esto se explica principalmente debido a sus características: no son puntos discretos, por lo que sus coordenadas no se pueden digitalizar directamente desde los puntos de referencia colocados en la muestra, y carecen de grados de libertad con respecto a los *landmarks* (Zelditch et al., 2004).

Para realizar el análisis de *semilandmarks*, se ha de llevar a cabo una superposición (similar a la realizada con los *landmarks*) y para ello se han propuesto varios criterios para permitir el deslizamiento (*sliding*, en inglés)

de los puntos a lo largo de la curva o superficie mediante un método de optimización concreto. Los dos procesos más empleados para realizar el deslizamiento de los puntos tienen como objetivo el minimizar las diferencias de la *forma* entre cada individuo/espécimen y la forma consenso de la muestra (Gunz y Mittroecker, 2013):

- Criterio de minimización de las distancias de Procrustes (del inglés, *minimun Procrustes distance*; Sampson et al., 1996; Sheet et al., 2004; Sheet et al., 2006): se basa en el método de Superposición de Procrustes. Consiste en eliminar los componentes de diferencia tangentes a la curva entre la forma consenso y cada espécimen (Pérez et al., 2006). Así, se alinean los *semilandmarks* en líneas perpendiculares a la curva que contiene los *semilandmarks* de la *forma* de referencia. Además, cada *semilandmark* se desliza por separado sin verse influenciado por otros *semilandmarks* o *landmarks* (Gunz y Mittroecker, 2013). En este criterio, la minimización se realiza de la transformación uniforme y no uniforme (Basir et al., 2006).

- Criterio de minimización de la energía de torsión (del inglés, *minimun bending energy*; Bookstein, 1996, 1997; Bookstein et al., 2002; Green, 1996): se basa en el método de deformación de *thin-plate-spline*. Según este criterio, los *semilandmarks* se deslizan a través de una línea paralela al contorno de cada espécimen, disminuyendo así la energía de torsión entre el espécimen y la forma consenso. Aquí la *forma* es tratada como un todo y por ello los *semilandmarks* influenciados por *landmarks* anatómicos se deslizan juntos (Gunz y Mittroecker, 2013). La

minimización se realiza solamente de la transformación no uniforme (Bookstein, 1991; Basir et al., 2006).

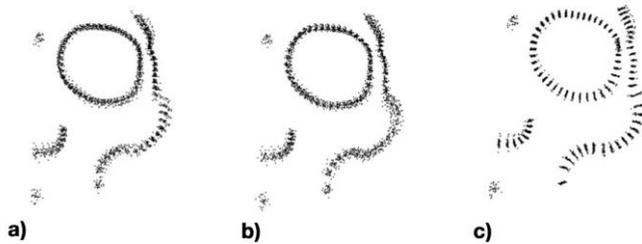


Figura 6.13. Ejemplo de distintos métodos de deslizamiento de *semilandmarks* en esplanocráneo (8 *landmarks* y 74 *semilandmarks*): a) Superposición de procrustes sin deslizamiento de *semilandmarks*; b) alineamiento mediante la minimización de la energía de torsión; c) alineamiento mediante el criterio de minimización de la distancia de Procrustes (Modificada de Pérez et al., 2006).

Si la variación de forma es pequeña y los *semilandmarks* no necesitan mucho desplazamiento, ambos criterios pueden aportar resultados similares; sin embargo, a mayor variación de forma y, por tanto, deslizamiento, el método de minimización de energía de torsión dará mejores resultados y con mayor correspondencia con la homología biológica.

Por ello, en este trabajo se aplicó el método de minimización de la energía de torsión empleando el programa TPSRelw (Rohlf, 2003). La segunda coordenada de cada *landmark* fue eliminada con el programa TPSUtil (Rohlf, 2004).

Mediante el deslizamiento se consigue que los *semilandmarks* adquieran homología geométrica, pudiendo ser usados como si fueran *landmarks* tradicionales en análisis estadísticos.

#### 6.4.3.2.6. Visualización de los cambios: la función *Thin-Plate-Spline* (TPS).

La visualización global de los cambios entre configuraciones de puntos de referencia se consigue con la aplicación del método de deformación de *thin-plate-spline* (TPS) a través de una función de interpolación que modela la relación de los desplazamientos de los *landmarks* entre sí.

Bookstein (1989, 1991) desarrolló esta función enfocada a resolver el problema de integrar la información de las posiciones relativas de cada *landmark*, y el problema planteado por D'Arcy Thompson (1942) de expresar las diferencias de *forma* entre dos especímenes en un espacio de coordenadas cartesianas (Slice, 2005). La función TPS se basa en la metáfora de una placa metálica delgada y uniforme en la que se dan los

desplazamientos de *landmarks* y donde se minimiza la energía para deformarla y que se asemeje a la forma consenso. Dicha deformación se dará según la energía de torsión que varía según la posición de los *landmarks*, siendo la energía necesaria inversamente proporcional a la distancia a la que se encuentren los puntos de referencia (Rohlf y Marcus, 1993).

A pesar de que la justificación del método es complicada, el álgebra es relativamente sencillo (Slice, 2005). En primer lugar, los puntos de referencias se alinean mediante el análisis GPA lo que permite comparar los especímenes entre sí, considerando la distancia de Procrustes como unidad de medida. Tras ello, una configuración de *landmarks*, la cual suele ser la forma consenso, se utiliza como referencia y las diferencias entre la localización de *landmarks* a lo largo de los ejes de coordenadas (X, Y en estudios bidimensionales o X, Y, Z en tridimensionales) y las correspondientes a otro espécimen son procesadas de manera separada. Para ello, cada eje de coordenadas se computa de forma individual y para cada dimensión de coordenadas, las configuraciones se consideran como un desplazamiento en ángulo recto, fuera del plano de la configuración de referencia. La variación total entre las dos configuraciones de puntos de referencia se expresa recomblando las ecuaciones derivadas de este proceso.

Este método deriva visualmente en las grillas de deformación donde los distintos *landmarks* de los especímenes se localizan en los valores positivos o negativos a través de los ejes con respecto a la forma consenso para cada coordenada de referencia.

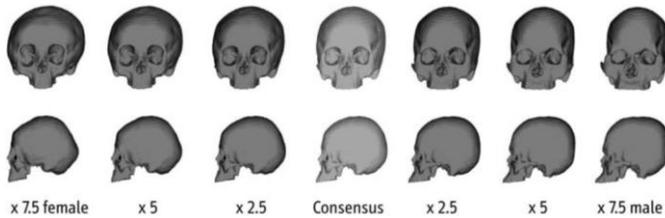


Figura 6.14. Visualización de los cambios en el análisis del dimorfismo sexual en una muestra de 40 individuos adultos. Las diferencias en la forma se encuentran exageradas para facilitar su interpretación (Modificada de Gunz et al., 2004).

#### 6.4.3.2.6.1. Deformación Uniforme (*Affine transformation*) y No uniforme (*Non-affine transformation*).

Bookstein (1991) propuso clasificar en dos la deformación producida en una configuración de puntos: uniforme (transformación afín) o no uniforme (transformación no afín).

La deformación uniforme abarca aquellas deformaciones que afectan de la misma forma a todos los puntos de la *forma* analizada. De esta manera, cada conjunto de líneas se mantiene paralelo tras el proceso de deformación. Hay seis tipos de deformación uniforme y cada uno de ellos es independiente al resto.

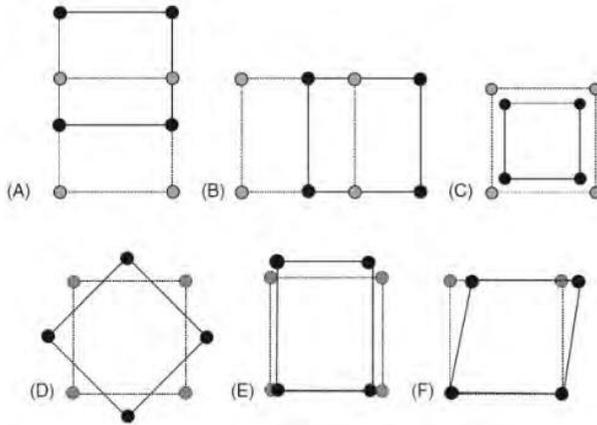


Figura 6.15. Seis transformaciones uniformes. A: traslación a lo largo del eje vertical; B: traslación a lo largo del eje horizontal; C: escalado; D: rotación; E: compresión/dilatación; F: cizallado (*shearing*). Forma original en puntos discontinuos, deformación en línea continua (modificado de Zeldicht et al., 2012).

La deformación no uniforme engloba las deformaciones que se dan en zonas localizadas, es decir, en *landmarks* puntuales. Por consiguiente, pierden su paralelismo.

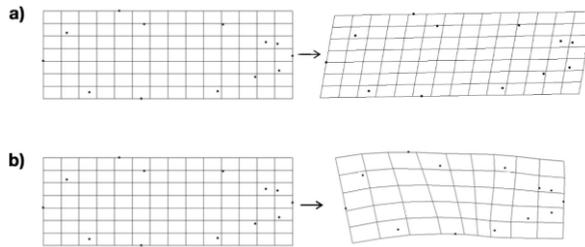


Figura 6.16. Grillas de deformación representando una transformación uniforme (a) y no uniforme (b) (Modificada de Van der Molen et al., 2007).

Estas deformaciones se describen mediante unos parámetros conocidos como *partial warp scores* los cuales se manipulan como variables y permiten analizar estadísticamente la variación de la *forma* entre las distintas poblaciones (Adams et al., 2004).

#### 6.4.3.2.6.2. Principal warps, partial warps y relative warps.

La función TPS puede desgranarse en un rango de componentes geoméricamente independientes que difieren en la escala geométrica - en energía de flexión - y que pueden ser utilizados para realizar análisis estadísticos con métodos de ordenación (Bookstein 1989, 1991).

Los principal warps son los eigenvectores de la matriz de la energía de torsión (*bending energy matrix*, en inglés) resultantes de la aplicación de la función *thin-plate-spline*. Dicha matriz codifica los aspectos locales de la forma de referencia y sus eigenvectores sin aquellas combinaciones lineales del desplazamiento ortogonal de los *landmarks* que pertenecen a la configuración de referencia. Estos principal warps se ordenan según la energía de torsión que es necesaria para su desplazamiento, por lo que el primer principal warp se corresponde con el eigenvector más alto y con mayor energía de torsión (Slice, 2005).

Los partial warps son pares o trío de principal warps que se obtienen mediante eigenálisis de la matriz y se emplean para codificar las diferencias entre especímenes individuales y la *forma* consenso. Al igual que ocurre con los principal warps, se ordenan de mayor a menor según su energía de torsión. Sus valores se ven expresados en los ejes X e Y en estudios bidimensionales, o X, Y, Z en estudios tridimensionales. Hay tantos partial warps como dimensiones tiene el espacio Kendall; por tanto, cada uno de éstos son el valor para cada individuo, para cada coordenada y para cada eje de los principal warps (Slice, 2005). El resultado de cada uno de ellos, denominado partial warp score, son los coeficientes que indican la posición de cada individuo respecto a la *forma* de referencia. Estos partial warp scores se ubican en una nueva matriz denominada *weight matrix* (Rohlf et al., 1996) que consta de las variables de partial warps y el componente uniforme y contiene todas las variables de *forma* que servirán para realizar los análisis estadísticos multivariantes (Marugán-Lobón, 2007).

Los relative warps se refieren a los resultados del *relative warps analysis*, un análisis similar al análisis de componentes principales y son empleados para describir las tendencias en la variación morfológica entre especímenes. Estos relative warps pueden ser ponderados antes de calcular sus componentes principales, término utilizado cuando no se produce dicha ponderación (Zeldicht et al., 2012). Dichos componentes ponderados servirán para las combinaciones lineales de las variables originales y pueden ilustrarse como deformaciones de *forma* reales (Bookstein, 1991).

Así, mediante los anteriores análisis de deslizamiento, asentados en la teoría de deformación de *thin-plate-spline* (TPS), se obtuvieron unas grillas de deformación permitiendo así una descripción visualmente interpretable de las deformaciones en la *forma*, haciendo uso de la información perteneciente a las coordenadas de los *landmarks* (Webster y Sheets, 2010).

6.4.3.3. Análisis de la variación y covariación de la *forma* mediante métodos de ordenación y estadística multivariante.

Estos datos descriptivos de la *forma* de estudio tienen una dimensión muy amplia, por lo que puede ser complicada su visualización e interpretación. Así, estos datos pueden someterse a diferentes análisis con la finalidad de resumir y evaluar estadísticamente la variación de la *forma*.

#### 6.4.3.3.1. Métodos de Ordenación

Aquí se incluyen dos métodos principales que simplifican la descripción de la forma y no prueban una hipótesis. Estos métodos crean nuevos grupos de variables a partir de combinaciones lineales de las variables originales y están construidas para ser mutuamente ortogonales (Zelditch et al., 2012).

Se denominan métodos de ordenación (*ordination methods*, en inglés), puesto que los resultados obtenidos ordenan a los especímenes en función de las nuevas variables. A partir de este nuevo orden de variables se espera conseguir información sobre patrones en los datos, con el objetivo de obtener respuestas de la biología del espécimen.

##### 6.4.3.3.1.1. Análisis de Componentes Principales (PCA).

Las variables de *forma* que se obtienen de la función TPS describen la variación en regiones superpuestas de una estructura. Por consiguiente, las estructuras están influenciadas por el mismo proceso que causa la variación de la *forma*, por lo que es de esperar que las variables morfométricas se correlacionen entre sí, al describir características del organismo tanto a nivel funcional como genético (Zelditch et al. 2014).

Este análisis se realizó considerando el mismo número de variables como grado de libertad, utilizando la distancia de Procrustes como unidad de medida (Zelditch et al., 2012).

Los resultados de variación y covariación tras los análisis morfométricos, en muchas ocasiones son difíciles de interpretar. El Análisis de Componentes Principales (PCA) tiene como finalidad el simplificar y reducir la dimensionalidad de la variación de los datos a un número menor de dimensiones ortogonales para facilitar y simplificar su interpretación (Zelditch et al., 2012)

Esta simplificación se lleva a cabo mediante el reemplazo de las variables originales por otras nuevas que consisten en la combinación lineal de las variables originales y que son independientes entre sí. Las variables resultantes se interrelacionan entre sí sin que exista repetición o redundancia de información en el conjunto de componentes principales. Al ser un método de ordenación, los componentes principales se organizan de mayor a menos según la cantidad de varianza que expliquen.

Otra de las mayores ventajas con las que cuenta el PCA es la explicación mediante gráficos de dispersión (bidimensionales, que responde a los ejes x e y) de la varianza de cada componente, evitando la explicación de forma separada de muchas variables. El gráfico representa los cambios de forma entre ambos grupos (masculino y femenino) y la forma consenso pudiendo estudiar así las tendencias de variación de *forma* entre individuos masculinos y femeninos.

El primer componente principal se alinea con el eje que representa la máxima varianza (x) y el segundo componente principal, que es ortogonal al anterior, se alinea con la dirección correspondiente al siguiente de mayor varianza (y).

Por otro lado, el Análisis de Componentes Principales (PCA) se lleva a cabo con el objetivo de detectar errores en la localización de los *landmarks*. El gráfico de dispersión resultante permite observar si alguno de los sacros aparece muy alejado del resto y si dicha lejanía se puede corresponder a un fallo durante el proceso de localización de *landmarks*.

En ocasiones, los análisis de componentes principales se realizan siendo llamados *relative warps analysis*. Sin embargo, se ha de tener en cuenta la diferencia entre ambos: las variables obtenidas en el análisis de componentes principales no se ponderan a través de la energía de torsión, mientras que los componentes del *relative warps analysis* sí que son ponderados (Zelditch et al., 2012).

Para llevar a cabo este análisis se utilizaron los programas PCAgen (Sheets, 2003) y MorphoJ (Klingenberg, 2008).

#### 6.4.3.3.1.2. Análisis de Variables Canónicas (CVA).

La finalidad del Análisis de Variables Canónicas (CVA) es simplificar las diferencias entre grupos. Este análisis guarda relación con el PCA puesto que resultan nuevas variables mutuamente ortogonales de las combinaciones lineales de variables. Pese a que simplifique las diferencias entre grupos, no facilita una significación estadística, necesitando un análisis multivariante posterior.

Como sucede en el Análisis de Componentes Principales, se crea un nuevo sistema de coordenadas y localiza a lo largo de dos ejes, representado cada uno por una variable canónica, a los individuos. Estos ejes se escalan según los patrones de variación entre grupos, no es simplemente una rotación; es decir, la distancia entre grupos en el espacio de la *forma* no tiene por qué ser el mismo entre los grupos en el espacio original de la *forma* de los ejes originales (Webster y Sheet, 2010).

El análisis de variables canónicas presupone la igualdad de varianzas (homocedastidad), junto a una matriz de varianza-covarianza similar entre grupos. Por ello, el número total de individuos ha de ser mayor que el número de variables a analizar. Esta exigencia es difícil de cumplir en análisis con una muestra pequeña o en las que existen localizados una gran cantidad de *semilandmarks*. Sin embargo, el análisis de componentes principales, el cual reduce la dimensionalidad de los datos, permite obtener un número de componentes inferior al número de individuos del grupo con el menor tamaño muestral (López-Lázaro, 2015).

En el presente trabajo, debido a la necesidad de reducir los datos, dado el gran número de variables obtenidas de la localización de *landmarks* y *semilandmarks*, se disminuyó el número de componentes principales hasta ser inferior al tamaño muestral del grupo minoritario.

La Lambda de Wilks ( $\lambda$ ) tiene el objetivo de determinar el número de variables canónicas que son estadísticamente significativas y, por consiguiente, distintas al resto y el poder discriminante de las mismas. Por lo que el hallazgo de una o más variables canónicas significativas implica que, al menos uno de los grupos, puede ser diferenciado en relación con esas variables (Webster y Sheets, 2010).

La utilidad del análisis de variables canónicas en un análisis discriminante entre grupos se considera mediante la distancia entre cada individuo y la media del grupo. Generalmente, la asignación de los especímenes en los distintos grupos se realiza mediante el procedimiento de validación cruzada, donde se toma un pequeño número de individuos de la muestra (entre el 1 y el 10%) que se omite del análisis y sirven como un conjunto de prueba. Los individuos omitidos se tratan como desconocidos y se les asigna a un grupo según los resultados obtenidos incluyendo el resto de los individuos (Webster y Sheets, 2010). Este proceso se repite con los diferentes individuos, dejando a un individuo fuera en cada iteración, recalculando la media grupal y clasificando al individuo según la distancia entre el mismo y la media recalculada, hasta obtener una ratio de asignación.

El gráfico de dispersión del análisis de variables canónicas, así como las grillas de deformación a lo largo de dichas variables, se obtuvieron con el programa CVAgen (Sheet, 2011).

6.4.3.4. Estadística Multivariante: Análisis multivariado de la varianza (MANOVA) y análisis de permutación.

No obstante, los análisis descritos anteriormente son de ordenación, que permiten ver los patrones de variación y covariación de la *forma* pero que no comprueban una hipótesis, por lo que se hace necesario un análisis con técnicas de estadística multivariada.

El análisis multivariado de la varianza (MANOVA) tiene como objetivo analizar la significación estadística de las diferencias de *forma* entre grupos, en relación con variables categóricas que serán consideradas de forma simultánea (Cooke y Tehurne, 2015).

Dicho análisis se basa en la normalidad de la distribución de la muestra y la homogeneidad de las matrices de varianza-covarianza. Estos supuestos se comprobaron con el test de Kolmogorov-Smirnov, la prueba de Levene y la M de Box, respectivamente.

En el espacio de la *forma*, el análisis múltiple de la varianza se realiza mediante el test estadístico de F de Goodall, que compara las

distancias Procrustes entre medias de dos grupos a partir de la variación dentro de cada grupo (Goodall, 1991; Rohlf, 2000). Este test informa sobre la variación explicada (intergrupala) y no explicada (intragrupala) de las distancias Procrustes (Webster y Sheet, 2010). La utilidad del test radica en su empleo como una prueba paramétrica en el espacio de la *forma*, donde los efectos de traslación, escalado y rotación se han eliminado. Sin embargo, como refleja el grado de separación entre los grupos, sin tener en cuenta la naturaleza de distribución (isotrópica o no) de los especímenes; el test asume que hay estructuras de covarianza similares; es decir, que existe distribución isotrópica normal en torno a la media, y por ello puede aportar suposiciones erróneas cuando los tamaños de muestra son pequeños, o incluso desiguales entre sí (Klingenberg y Monteiro, 2005).

Para evitar la asunción isotrópica normal de las variables, el test estadístico de F de Goodall se combina en muchas ocasiones con métodos de permutación basados en un remuestreo aleatorio y hallar así el rango de F, mediante la asignación aleatoria de especímenes a los distintos grupos. La prueba de aleatorización (*randomization test*) tienen la ventaja de no tener restricciones, siempre y cuando los casos se muestreen de forma independiente (Mitterocker y Gunz, 2009). Este proceso de remuestreo aleatorio, permite conocer si la distribución de probabilidad de los valores ha sido casual y permite obtener estimaciones acerca del error estadístico.

El análisis discriminante por sexo se llevó a cabo mediante el método de la validación cruzada dejando uno fuera. En un primer análisis se incluyó solo las variables de la forma y a continuación en un posterior análisis se incluyeron las variables de forma y del tamaño del centroide (la

cual se estudió como variable independiente). Todos estos análisis se realizaron con el paquete estadístico IBM SPSS v21.0. (Corp I.B.M., 2012).

Las diferencias entre las medias de ambos sexos se analizaron mediante un test de permutación basadas en remuestreos aleatorios (N=4900) con el programa TwoGroups (Sheets, 2003).

#### 6.4.4. La morfometría geométrica y la Antropología Forense.

La Antropología ha ido progresivamente desarrollando nuevas metodologías estadísticas ya para responder a nuevas preguntas que se planteaban, o bien para aplicar o difundir nuevas técnicas. Desde el siglo XIX, los antropólogos investigan haciendo uso de los nuevos métodos morfométricos y cada vez son más los científicos que los incluyen en sus investigaciones. De esta forma, la morfometría se ha ido estableciendo como un paradigma analítico maduro y con un uso exponencial (Slice, 2007).

Una de las principales ventajas del uso de morfometría en Antropología es el análisis de la *forma* biológica, es decir, la capacidad de análisis de las numerosas regiones anatómicas dentro del esqueleto humano. Todo este abanico de posibilidades ha logrado producir una gran cantidad de literatura científica donde se pueden encontrar estudios donde se relacionan la Antropología Física y la morfometría: alometría, ontogenia, variación morfológica, etc.

En el campo de la Antropología Física y Forense, es útil tener estudios teóricos de base pero se evidencia la necesidad de estudios posteriores que permitan su aplicación práctica y que además sean útiles para poder realizar la estimación de rasgos como podrían ser la edad, o el sexo, que es el tema que ocupa al presente trabajo.

6.5. Comparación poblacional: Estudio de dimorfismo sexual mediante la aplicación de fórmulas de regresión.

#### 6.5.1. Introducción a la validación de metodologías

Validar un método consiste en ponerlo a prueba con la finalidad de comprobar su eficacia, es decir, cuantificar la exactitud de los resultados comprobando su fiabilidad, repetibilidad y robustez estadística cumpliendo los compromisos éticos requeridos en el campo de las Ciencias Forenses (Madrigal, 1998; Christiensen et al., 2009; Ferrante et al., 2009; Davies, 2013b).

En el campo de la Antropología Forense la validación se hace prioritaria. Esto se evidencia con las revisiones publicadas en los últimos años donde se remarca la importancia de validar la metodología que se desarrolla (Olze et al., 2006; Ubelaker, 2008; Ferrante, 2009; Cunha et al., 2009; Liversidge et al., 2010a...).

Sin embargo, no existe un consenso en cuanto al nivel aceptado de exactitud (Liversidge, 2008) en Antropología Forense, sino que este nivel guarda relación con los organismos judiciales y los contextos forenses y la admisibilidad de la prueba. En estas situaciones, el investigador debe tomar consciencia del error en los métodos utilizados, el cual puede provocar que los resultados de su trabajo sean inadmisibles. Por tanto, en la elección del

método prima el material disponible y su estado por encima del margen de error, el cual puede ser elevado –siempre y cuando sea un trabajo de investigación que asegure unas medidas apropiadas de fiabilidad (Christensen, 2009).

Los métodos diseñados para la estimación de algún rasgo concreto o identificación forense deben de cumplir, como se ha demostrado, una serie de requisitos científicos y estándares de calidad para que el investigador sea capaz de decidir el método más apropiado a aplicar. Sin embargo, en la actualidad no se cuenta con organismos institucionales que comprueben la calidad en el ejercicio de la profesión de la Antropología Forense (Rösing et al., 2007).

Pese a ello, la importancia de esto ha quedado plasmada a lo largo de la historia mediante casos judiciales en los cuales se requería un criterio que evaluara el testimonio de los científicos. En Estados Unidos se creó una de las primeras guías de buenas prácticas, recomendaciones o criterios mínimos que permitían a los jueces decidir sobre la admisibilidad o no de los argumentos científicos. Ésta fue la conocida como Estándar de Daubert (llamada así por los afectados en el juicio; Christensen, 2009):

- El método debe haber sido puesto a prueba de forma previa.
- Se debe de conocer el margen de error asumido.
- El método ha debido ser publicado y revisado por otros científicos.

- El método ha sido aceptado por otros científicos.

Para asegurar la calidad de los resultados obtenidos y la utilidad de los mismos dentro de cualquier proyecto de investigación, la metodología empleada en la toma de datos también ha de ser controlada, organizada y descrita en la publicación de los resultados. De esta forma, los investigadores independientes pueden replicar el proceso exactamente del mismo modo (Irurita, 2014).

- Consideraciones o “buenas prácticas” en la toma de datos:

1. Experiencia previa para evitar la adquisición de nuevos hábitos de repetición y ser consciente de los errores que se pueden cometer. Así se consigue una metodología constante a lo largo de todo el estudio.

2. Objetividad: la variable de estudio se cuantifica sin conocer el rasgo con el que se quiere relacionar (en este estudio, el sexo del individuo). Así se evita la sugestión del investigador.

3. El instrumento de medida ha de estar homologado y contar con suficiente precisión para la toma de datos. A lo largo del estudio, no se debe de cambiar por otro.

4. Los estudios incluirán todos los resultados ya sean negativos, inesperados o discordantes. Además, también se incluirán los posibles cambios o errores que hayan sido cometidos durante el transcurso del estudio.

5. Los datos recogidos para el desarrollo del análisis han de ser almacenados y custodiados por el investigador responsable hasta que la investigación esté finalizada. Así se permite una reevaluación de los mismos por parte de terceros en futuros estudios.

#### 6.5.1.1. Requisitos de las muestras

Las muestras utilizadas en validación han de ser homogéneas para los grupos analizados en el estudio, además de ser diferentes a la muestra original. El origen poblacional puede ser el mismo o diferente entre las muestras, permitiendo cuantificar la variabilidad intra- e interpoblacional. Por otro lado, las muestras han de ser representativas o amplias ya que cuando éstas son reducidas, la variabilidad en las características que influyen en la estimación puede sesgar los resultados (Liversidge, 2008).

La muestra empleada en la validación ha de contar con una distribución, estructura y tamaño similares a la muestra original. Además, se cuentan con factores como la distribución por sexo, la edad de los individuos o el estatus social, que pueden sesgar la muestra a validar hacia las características de la muestra original (Liversidge, 2008).

### 6.5.1.2. Características del método utilizado para la creación del modelo

La metodología que se emplea para crear el modelo se toma en consideración de la misma forma que se hace con la muestra original. Por ejemplo, se ha de conocer el tipo de estudio, cuáles fueron los pasos para realizar el estudio, los cálculos necesarios para estimar el rasgo, etc. (Smith, 1991; Liversidge, 2008; Harris, 2011; Liversidge, 2010a, b).

Liversidge et al. (2010) comprobaron que utilizando el método de validación de Demirjian et al. (1973) las diferencias eran significativas cuando se utilizaban las puntuaciones ponderadas a partir de todos los dientes de cada individuo. Estas diferencias, por tanto, se podrían ocasionar por error en la metodología o en el diseño del método.

### 6.5.1.3. Consideraciones relacionadas a la validación de métodos.

Las condiciones de desarrollo de los métodos han de ser las mismas para validar los modelos o métodos diseñados. Si en algún momento se hubieran de realizar cambios, previamente se ha de demostrar que dichos cambios no alterarían de forma significativa los resultados.

La problemática de la validación radica en que los investigadores tienden a realizar adaptaciones de los métodos, es decir, adaptan las

condiciones del estudio a sus propias circunstancias, modificando por ello las condiciones originales. En aquellas ocasiones en las que de forma previa se es consciente del posible incumplimiento de alguna de las condiciones para realizar la validación, se aconseja retirar del estudio algunos individuos; es decir, no usarlos en el diseño del método, para posteriormente realizar en ellos la validación del método desarrollado (Irurita, 2014).

6.5.1.4. Criterios de la Sociedad Europea de Antropología Forense (FASE) (Cunha, 2009) y el Scientific Working Group for Forensic Anthropology (SWGANTH) para la elección del método y su validación:

- El método se ha publicado en medios de divulgación y se ha presentado a la comunidad científica.
- El método ha de especificar las limitaciones que tiene y debe concretar el grupo poblacional en el que puede ser aplicado y los factores y condiciones de uso.
- La publicación ha de contener la metodología que se ha seguido para el desarrollo del método, así como su interpretación, su forma de uso y su verificación.
- El método se ha de escoger por razones científicas, no por preferencia personal; es decir, se ha de considerar el objeto de estudio, la muestra a estudiar y en nuestro caso, el estado de conservación.
- Característica de la muestra:
  - Se ha de detallar el número de individuos, grupos de edad, sexo u origen poblacional junto a criterios de inclusión y exclusión

aplicados además de la naturaleza de la muestra (si es hueso seco, TAC, etc.).

- La muestra ha de estar compuesta por individuos identificados, con datos como la edad exacta, el sexo y la causa de muerte conocidos. Además, deberá de ser lo más contemporánea posible.

- Dicha muestra ha de ser grande y aleatoria para el rasgo evaluado, cumpliendo los supuestos de normalidad e igualdad de varianzas en la mayoría de los métodos estadísticos aplicados.

- Características de los análisis aplicados:

- Han de incluir información sobre: el error asumido, tanto intra- como interobservador; intervalos de predicción; o intervalos de confianza (o tasa de clasificación correcta).

- Los métodos desarrollados han de ser validados mediante una muestra de estudio independiente con características similares a la original.

- El investigador ha de conocer las limitaciones y las implicaciones de los estadísticos utilizados como la normalidad en la distribución de la muestra, la igualdad de varianzas, etc.

- Los métodos han de ofrecer resultados específicos para cada grupo analizado (sexo, en el presente estudio).

- Se valorarán los factores que condicionan la incertidumbre de la medida como, por ejemplo: el tipo y el estado de conservación de la muestra, el instrumento de medida, etc.

- La metodología utilizada en la muestra de origen debe ser la aplicada en la muestra analizada, por ejemplo: si el método se desarrolló en base a TAC, para el estudio solo se utilizarán TAC.

- La aplicación de diversos métodos puede incrementar la exactitud de los resultados siempre y cuando se consideren las limitaciones de cada uno de ellos y se prioricen en función de los parámetros expuestos.

Pese a estas recomendaciones, no siempre podemos emplear metodologías que cumplan todos los criterios (dependerá de los restos disponibles, el estado de conservación, etc.) y por ello, primará el método más apropiado justificando sus ventajas y sus limitaciones.

### 6.5.2. Composición final de la muestra

La muestra total para esta parte del estudio se compone de tres series o colecciones diferentes cuya composición se condiciona según los factores limitantes previamente descritos.

#### 6.5.2.1 Serie del Cementerio de San José de Granada.

La muestra perteneciente a la colección de San José del cementerio de Granada se corresponde con la muestra utilizada en el apartado del

análisis de regresión logística binaria. En total se compone de 170 individuos adultos siendo 99 de sexo masculino y 71 de sexo femenino.

#### 6.5.2.2. Serie del Cementerio de Órgiva de Granada.

La muestra perteneciente a la colección del cementerio de Órgiva se compuso mediante la aplicación de los criterios de exclusión e inclusión descritos previamente.

La muestra final se compone de 70 individuos adultos, de los cuales 32 pertenecen al grupo masculino y 38 al grupo femenino.

#### 6.5.2.3. Serie de la Colección Osteológica de Grant de Toronto.

Los sacros utilizados para componer la muestra perteneciente a la colección Osteológica de Grant de Toronto se seleccionaron siguiendo los criterios de inclusión y exclusión descritos previamente.

Además, debido a la gran diferencia entre grupos, se decidió utilizar una muestra de 51 individuos tratando de esta forma de evitar algún posible error causado por esta diferencia de tamaño muestral.

Finalmente, la muestra se compone de 51 individuos adultos, 36 pertenecientes al sexo masculino y solo 15 pertenecientes al sexo femenino.

### 6.5.3. Obtención de los datos

Tras los análisis realizados previamente, se seleccionaron las medidas que son reproducibles y muestran una sustancial –o moderada– concordancia, una distribución normal, y mostraron diferencias significativas entre ambos grupos –masculino y femenino–. Por ello, se tomaron un total de 10 medidas del sacro.

La recogida de los datos se realizó con la utilización de un calibre digital con una precisión de 0.01 mm. Las medidas se fueron digitalizando en una base de datos conjunta para las tres series añadiendo la variable de “población” y así poder agrupar a los individuos. Esta digitalización se llevó a cabo con el paquete estadístico IBM SPSS v21.0.

### 6.5.4. Codificación de los datos

La base de datos se fundamenta en el número de individuos, el sexo y la población a la que pertenecen y, finalmente, las 10 medidas definidas previamente para el sacro.

Las medidas se codificaron en base a sus siglas, añadiendo, cuando fue necesario, la codificación relacionada con la lateralidad de la medida. El resto de las variables se codificaron mediante etiquetas siendo:

- Sexo
  - 1 = Sexo masculino
  - 2 = Sexo femenino
  
- Población
  - 1 = San José
  - 2 = Órgiva
  - 3 = Grant

#### 6.5.5. Tratamiento estadístico.

##### 6.5.5.1. Análisis descriptivo

Como paso previo al resto de análisis, se realizó el análisis descriptivo de las muestras.

Primero se realizó un análisis en conjunto de las tres colecciones incluyendo datos de las 10 variables seleccionadas en el estudio de regresión logística. Tras ello, se realizó un análisis de las variables, separando a los individuos en base al sexo al que pertenecen y posteriormente se realizó el análisis separando a los individuos en base a la población de pertenencia.

Finalmente, se realizó un análisis por variables separando a los individuos en base a la colección a la que pertenecen y a su vez separados en base al sexo.

#### 6.5.5.2. Selección de las fórmulas de regresión

Teniendo en cuenta los porcentajes ponderados de clasificación correcta de todas las fórmulas –incluyendo el análisis univariante y el multivariante- se seleccionaron aquellas fórmulas considerando los estándares de Daubert, para mantener el rigor científico. Por esta razón, se seleccionaron aquellas fórmulas que, tras ponderar sus tasas de clasificación correctas, presentaron porcentajes superiores al 75%, siendo este un porcentaje aceptable para estimar el sexo de un individuo.

#### 6.5.5.3. Comparación de poblaciones

Tras obtener los datos y con la finalidad de obtener más datos sobre las distintas series para poder determinar si la aplicación de las fórmulas es viable o no, se realizó una comparación entre las series 2 y 3 –Órgiva y Grant- con la serie de referencia –San José-.

Previa a la comparación de medias, se comprobó la normalidad de las distribuciones de los datos para cada variable mediante el test de Kolmogorov-Smirnov.

De forma consecutiva, se realizó un análisis mediante la t de Student del dimorfismo sexual de cada una de las variables incluidas en las fórmulas, con la finalidad de conocer si hay diferencias significativas entre el grupo masculino y el femenino en cada una de las poblaciones.

La comparación de medias se realizó también con las tres medidas que conforman las fórmulas utilizadas. El análisis se separó en tres fases según el sexo de los individuos realizando primero el análisis en el grupo masculino, luego en el femenino y finalmente en el total de las muestras.

Para cada uno de estos grupos primero se compararon las diferencias entre la serie de San José y Órgiva y posteriormente entre la serie de San José y Grant.

Este análisis de comparación de medias se realizó mediante el estadístico de la t de Student, que permite cuantificar las diferencias entre las muestras a través del valor de significación (p).

#### 6.5.5.4. Análisis del grado de dimorfismo sexual

Finalmente se realizó el estudio del grado de dimorfismo sexual de cada una de las muestras estudiadas con el objetivo de poder comparar el grado de dimorfismo con la serie de referencia que dio origen al método.

Conocer el grado de dimorfismo sexual nos permite conocer las diferencias entre las series que se utilizan en esta parte del presente trabajo y poder entender mejor los resultados previos estableciendo una metodología ante la selección y aplicación de, en este caso, las fórmulas de regresión logística.

Este análisis del grado de dimorfismo sexual se realizó siguiendo el proceso descrito por Relethford (1985) con el objetivo de conocer las diferencias entre las muestras y aportar una metodología que nos permita conocer si la aplicación de las distintas metodologías es, o no, apropiada para las muestras.

El dimorfismo sexual se comenzó a estudiar con fines variados: (i) estimación del sexo en restos óseos (Van Gerven and Oakland, 1974; Alemán et al., 1997), (ii) explicar la variación en los fósiles de homínidos que se han ido encontrando a lo largo de la historia (Wolpoff, 1976), (iii) realizar análisis de correlación entre ecología y comportamiento entre las especies de primates y, (iv) establecer correlaciones entre la variación de la cultura humana (Leutenegger and Cheverud, 1982; Gray y Wolfe, 1980).

Este dimorfismo sexual se hace más evidente si se analizan características donde los individuos masculinos son más grandes que las mujeres. Por tanto, el grado de dimorfismo sexual puede ser estudiado como una medida de adaptación biológica.

La forma de estimar estadísticamente esta diferencia sexual ha sido muy variada incluyendo: (i) la media de un sexo expresado en porcentaje de la media del otro sexo (Hamilton, 1982), (ii) la utilización de test no paramétricos como la U de Mann-Whitney (Hamilton, 1982), (iii) la sobreposición de curvas normales (Bennet, 1981), entre otros.

La ventaja que presenta la metodología propuesta por Relethford (1985) es que utiliza un método computacional simple que permite calcular las diferencias significativas entre dos muestras mediante la aplicación de estadísticos en vez de los datos “crudos” u originales.

Uno de los métodos para analizar el dimorfismo sexual es el uso del test de la t de Student, el cual se basa en una regresión lineal donde una de las variables es dicotómica –en el presente trabajo se identifica con el valor del sexo del individuo-. Además, este análisis nos permite conocer el valor de la pendiente de regresión según el valor de la significación (Sokal y Rohlf, 1969).

Este procedimiento es un caso especial de análisis de covarianza que deriva en la metodología desarrollada por Relethford (1985). Teniendo en cuenta las ecuaciones descritas por Sokal y Rohlf (1969):

$$t = (b_1 - b_2) / \sqrt{AB/df}$$

$$df = N_1 + N_2 - n$$

donde:

- $b_1$  y  $b_2$  son la diferencia entre el promedio masculino y femenino para las muestras 1 y 2
- $\sqrt{AB/df}$  es el error estándar de diferencia de promedios de  $b_1$  y  $b_2$
- $N_1$  y  $N_2$  son el tamaño de las muestras 1 y 2
- $n$  es el número de grupos entre ambas muestras (4)
- 1 representa a la muestra 1
- 2 representa a la muestra 2

Una vez que la suma de los cuadrados y los productos cruzados se han ido transformando en su escritura, los términos de las ecuaciones se pueden sustituir y transformar la fórmula para el test de t de la igualdad de pendientes:

$$(b_1 - b_2) = (\bar{Y}_{m1} - \bar{Y}_{f1}) - (\bar{Y}_{m2} - \bar{Y}_{f2})$$

donde:

- $Y$  es el promedio del conjunto de datos
- $m$  son los individuos masculinos
- $f$  son los individuos femeninos

$$A = \frac{M_1 + F_1}{M_1 F_1} + \frac{M_2 + F_2}{M_2 F_2}$$

donde:

- $M$  es el número de individuos masculinos
- $F$  es el número de individuos femeninos

$$B = (M_1 - 1)s_{m_1}^2 + (F_1 - 1)s_{f_1}^2 + (M_2 - 1)s_{m_2}^2 + (F_2 - 1)s_{f_2}^2$$

donde:

- $s$  es la desviación estándar

$$df = M_1 + F_1 + M_2 + F_2 - 4$$

donde:

- $M$  es el número de individuos masculinos
- $F$  es el número de individuos femeninos
- 1 representa a la muestra 1
- 2 representa a la muestra 2

Tras haber realizado los análisis con cada una de las variables seleccionadas se obtuvieron: el grado de dimorfismo sexual, la  $t$  de Relethford, y el nivel de significación comparando las distintas series. Primero se realizó con la serie de San José y Órgiva y, posteriormente, con la serie de San José y Grant.

La interpretación de resultados del nivel de dimorfismo sexual se realiza en base al número 100, significando éste que ambos grupos – masculino y femenino- cuentan con el mismo grado de dimorfismo. La  $t$  arroja datos sobre las diferencias en el nivel de dimorfismo sexual entre las series estudiadas, siendo mayor cuánto más dispar es el nivel de dimorfismo sexual entre ellas.

Finalmente, el nivel de significación ( $p$ ) nos permite conocer la existencia, o no, de diferencias entre el conjunto de datos de las distintas muestras utilizadas en el análisis.

#### 6.5.5.5. Aplicación de las fórmulas de regresión

Una de las ventajas que presenta la regresión logística es que, una vez aplicadas las fórmulas, se arroja una probabilidad de acierto en la estimación del sexo del individuo. Por ello, se aplicaron las fórmulas seleccionadas en las series de Órgiva y Grant. Así, se obtuvieron los valores predictivos positivos para ambas series.

Posteriormente, estos valores predictivos positivos se compararon con los valores predictivos positivos ofrecidos por el método original. Esto último hace referencia a las tasas de clasificación correcta que tendrían las fórmulas si se hubieran realizado con las series con las cuales se realiza la comparación –Órgiva y Grant-.

## CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



## 7. 1. Análisis de regresión logística binaria

### 7.1.1. Composición final de la muestra

Siguiendo los criterios establecidos previamente, la muestra final está compuesta por 170 individuos adultos, de los cuales 99 pertenecen al sexo masculino y 71 al sexo femenino. El número total de sacos es de 170 obteniendo un total de 3910 mediciones.

### 7.1.2. Análisis de reproducibilidad y Concordancia

#### 7.1.2.1. Análisis del error intraobservador

Las Figuras 7.1 a 7.23 muestran los gráficos correspondientes a los resultados del análisis del coeficiente de correlación de concordancia de Lin (CCC). El eje y corresponde a las mediciones tomadas por el observador principal (A) en la segunda sesión de mediciones. El eje x ilustra las mediciones tomadas por el mismo observador (A) durante la primera sesión de mediciones. La línea continua que se muestra en los gráficos corresponde a la línea de ajuste total para ambas mediciones.

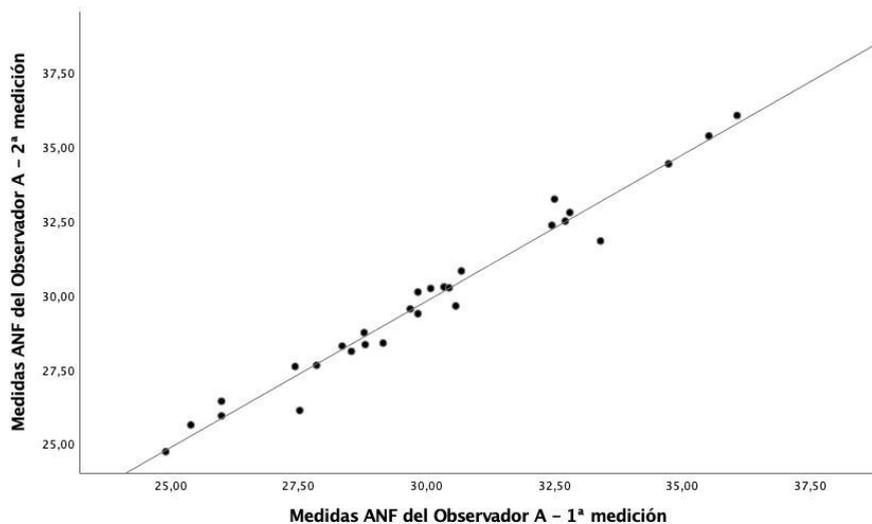


Figura 7.1. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANF, tomadas por el observador A.

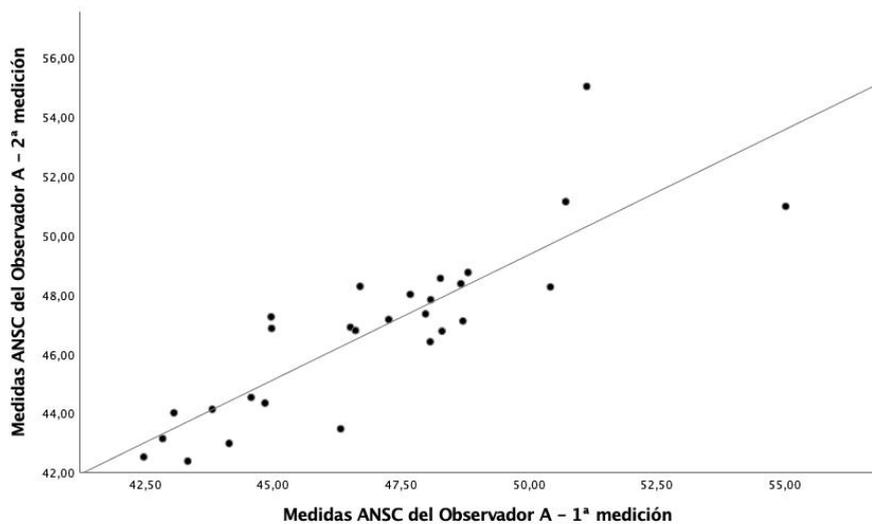


Figura 7.2. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANSC, tomadas por el observador A.

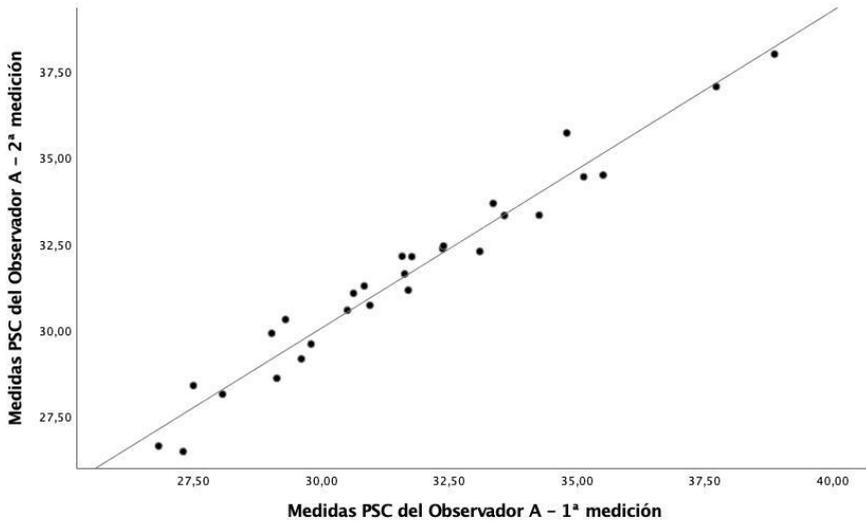


Figura 7.3. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones PSC, tomadas por el observador A.

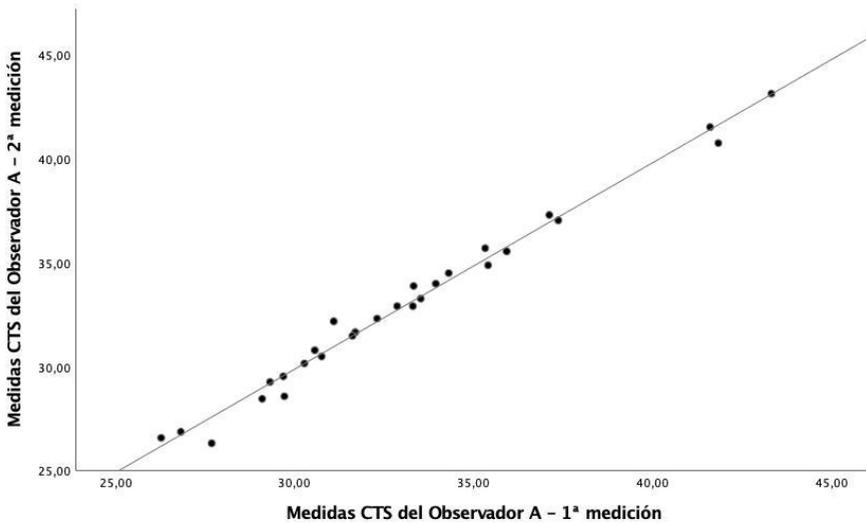


Figura 7.4. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTS, tomadas por el observador A.

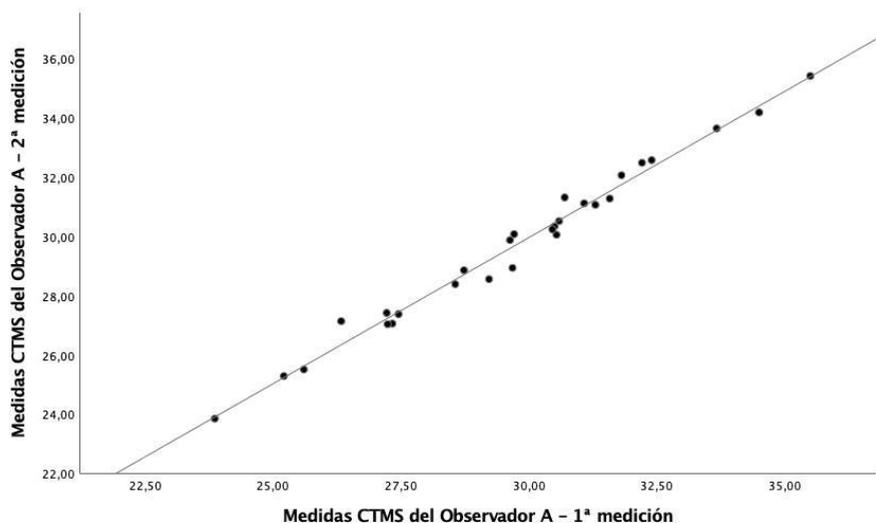


Figura 7.5. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTMS, tomadas por el observador A.

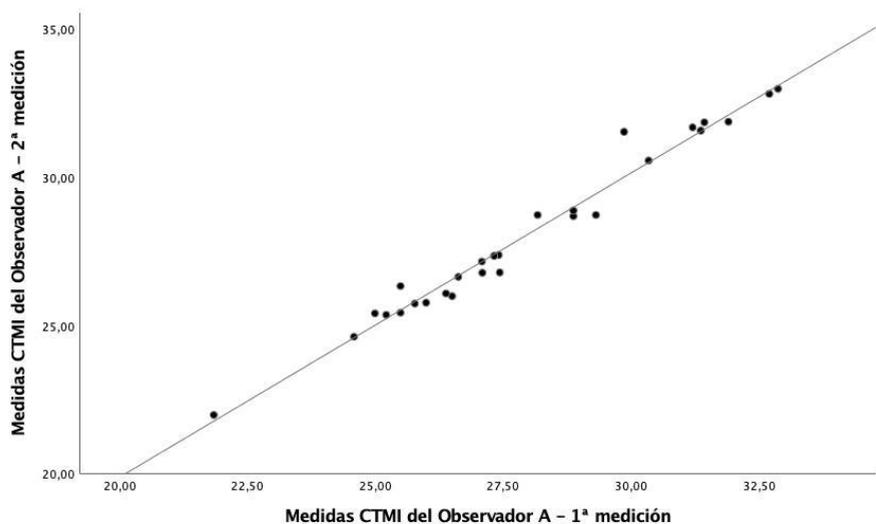


Figura 7.6. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTMI, tomadas por el observador A.

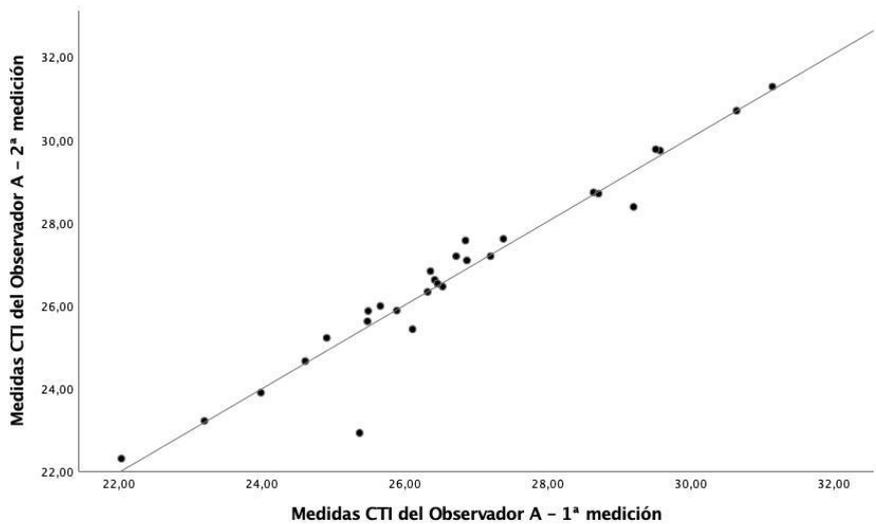


Figura 7.7. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTI, tomadas por el observador A.

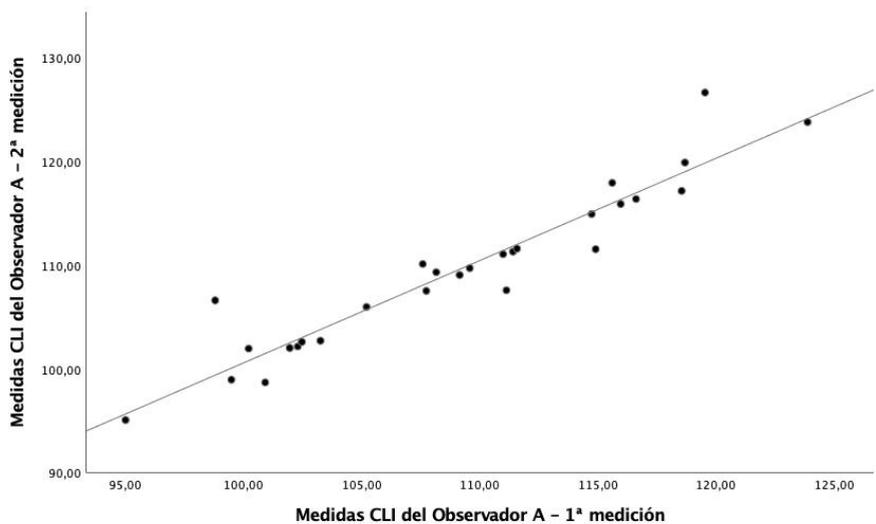


Figura 7.8. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CLI, tomadas por el observador A.

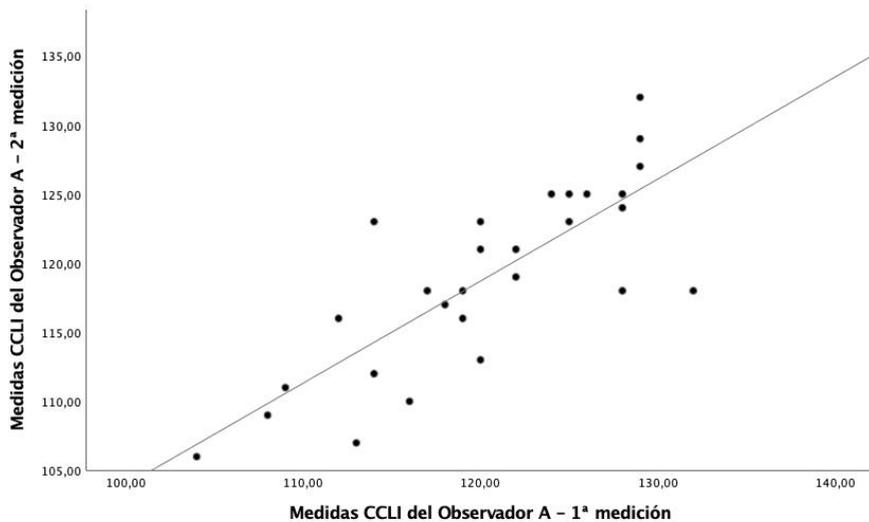


Figura 7.9. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CCLI, tomadas por el observador A.

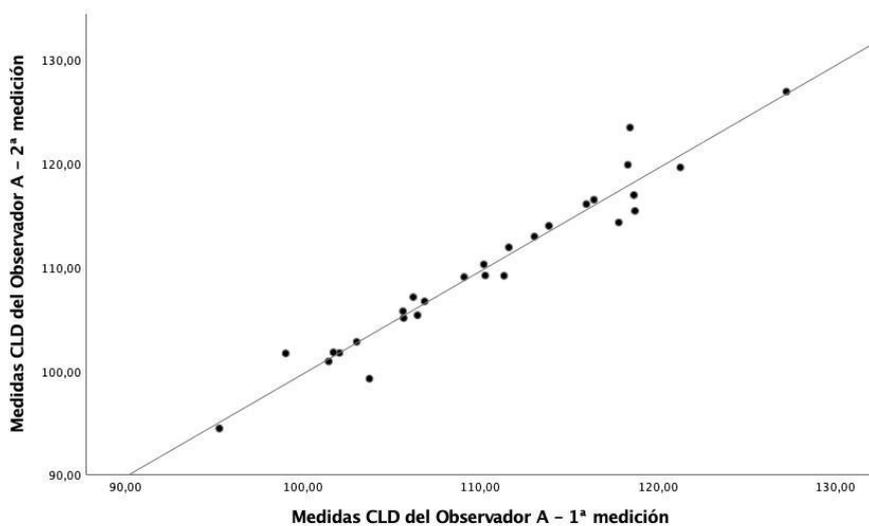


Figura 7.10. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CLD, tomadas por el observador A.

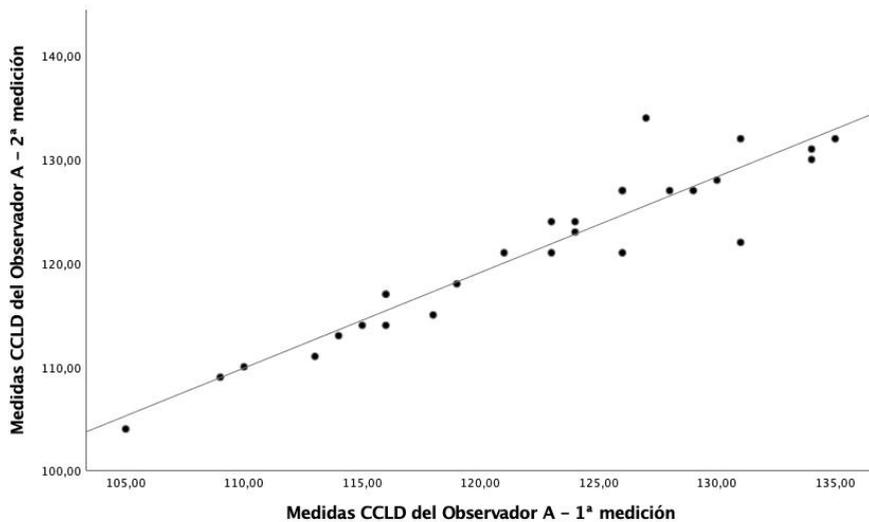


Figura 7.11. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CCLD, tomadas por el observador A.

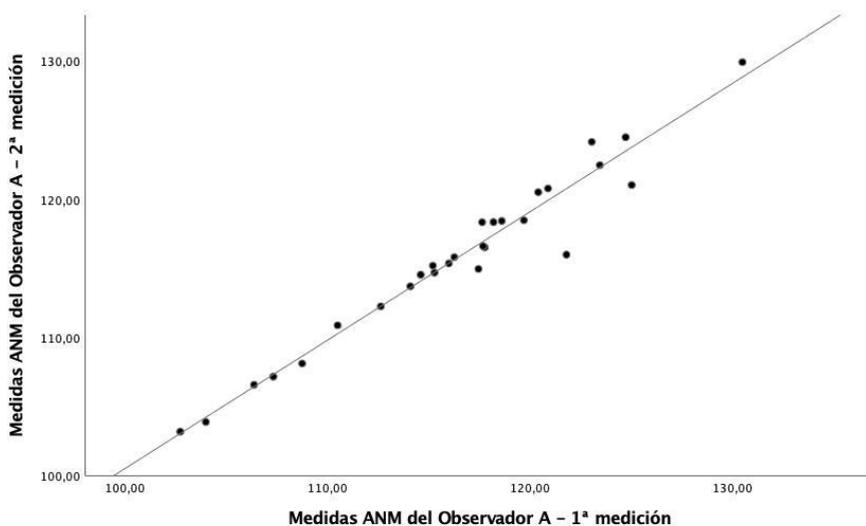


Figura 7.12. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANM, tomadas por el observador A.

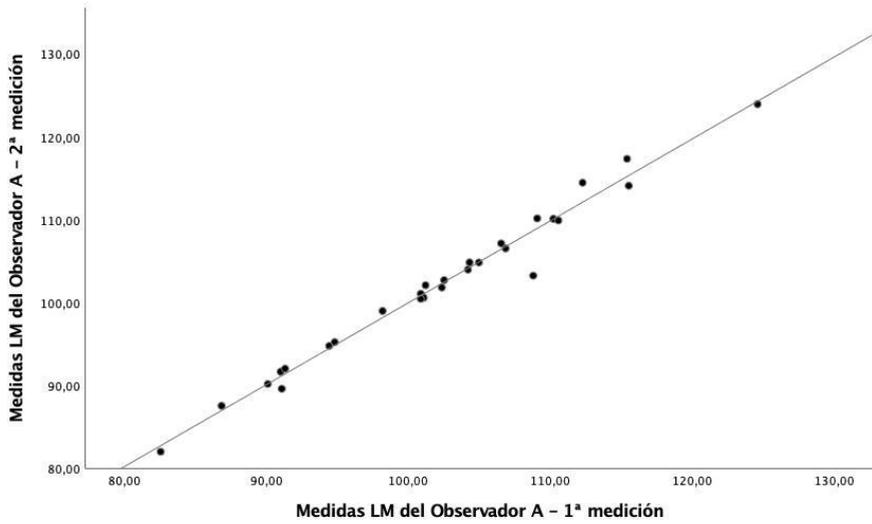


Figura 7.13. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones LM, tomadas por el observador A.

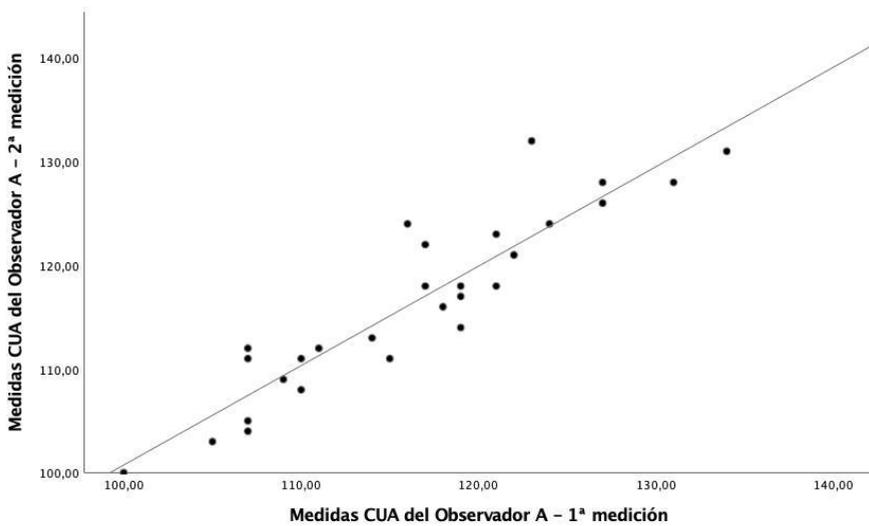


Figura 7.14. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CUA, tomadas por el observador A.

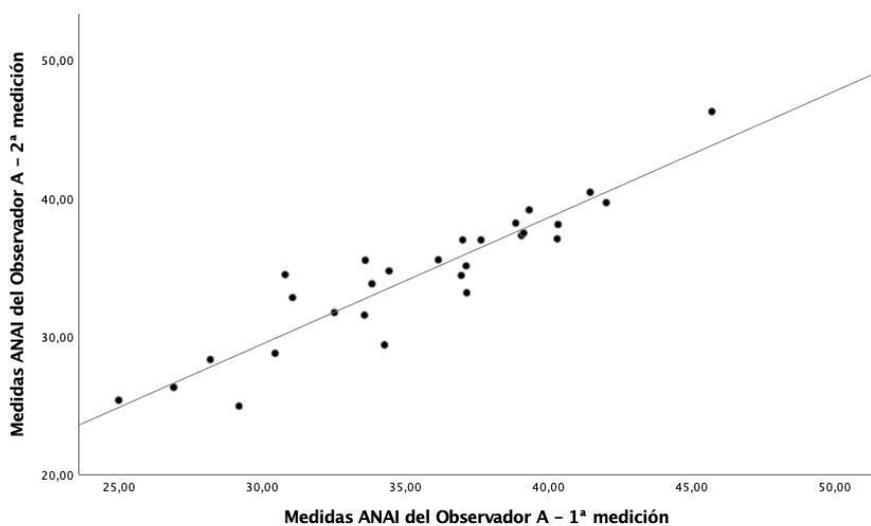


Figura 7.15. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANAI, tomadas por el observador A.

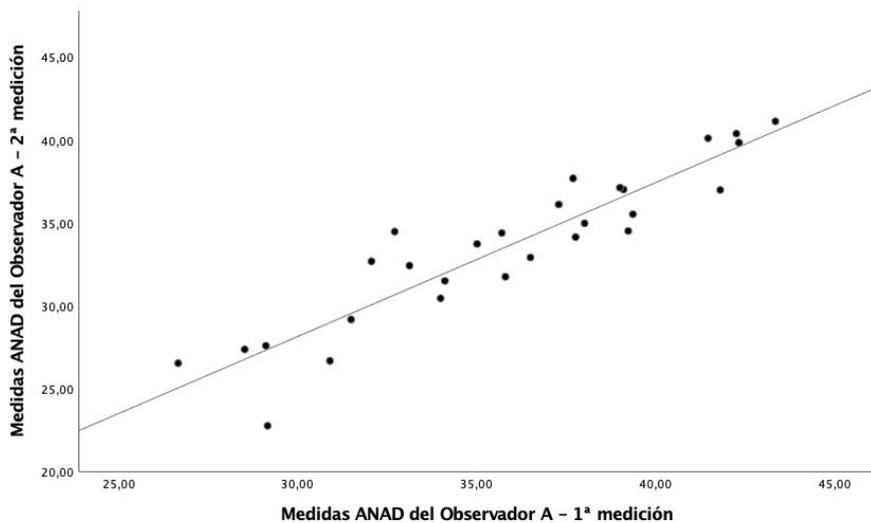


Figura 7.16. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANAD, tomadas por el observador A.

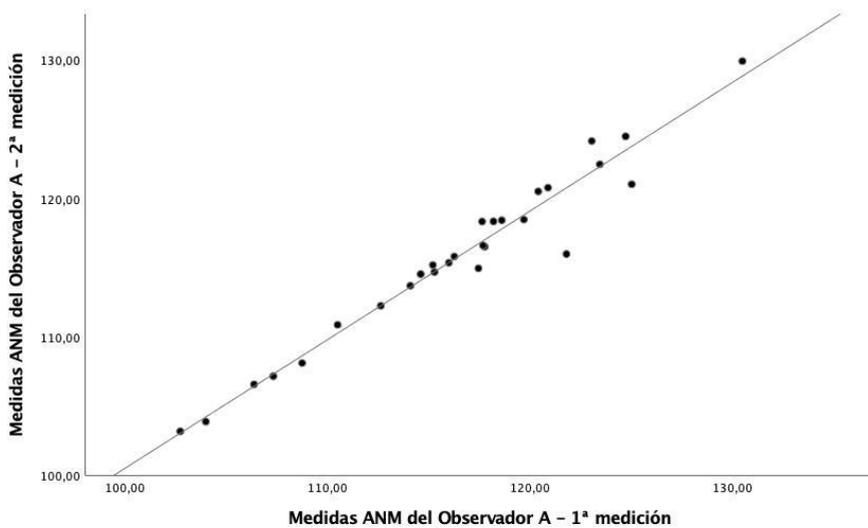


Figura 7.17. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANH, tomadas por el observador A.

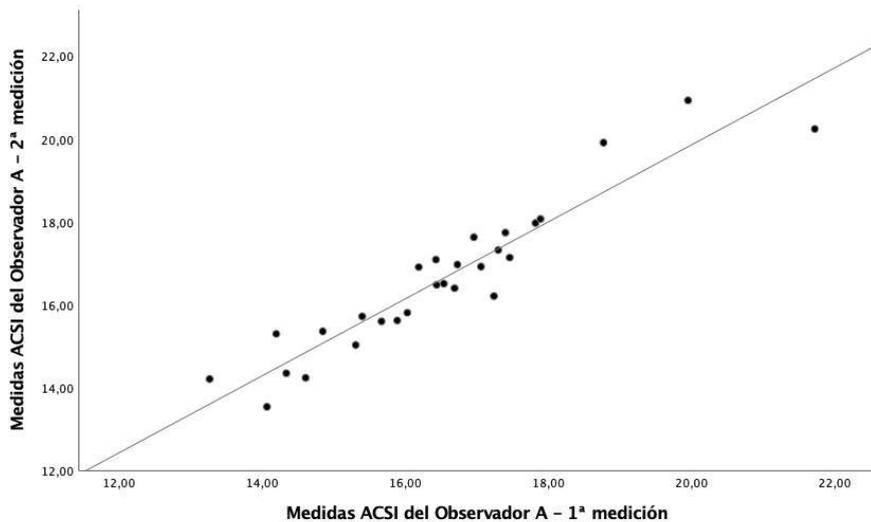


Figura 7.18. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACSI, tomadas por el observador A.

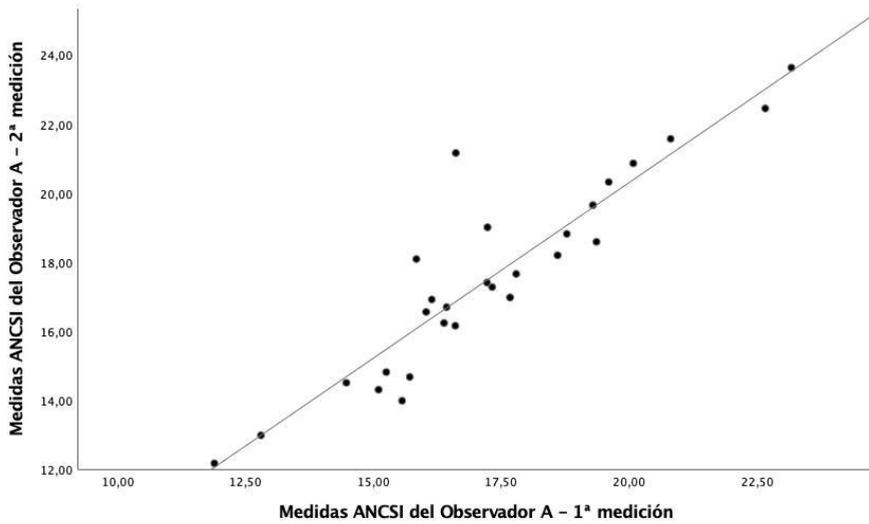


Figura 7.19. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANCSI, tomadas por el observador A.

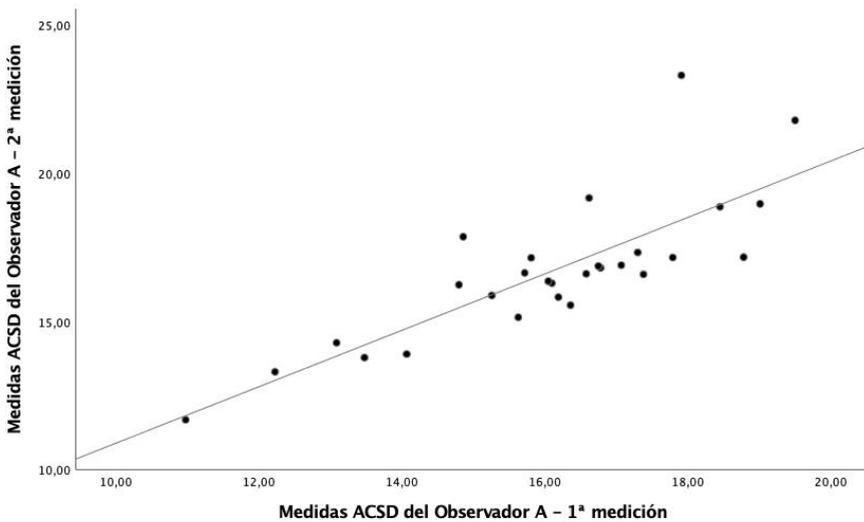


Figura 7.20. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACSD, tomadas por el observador A.

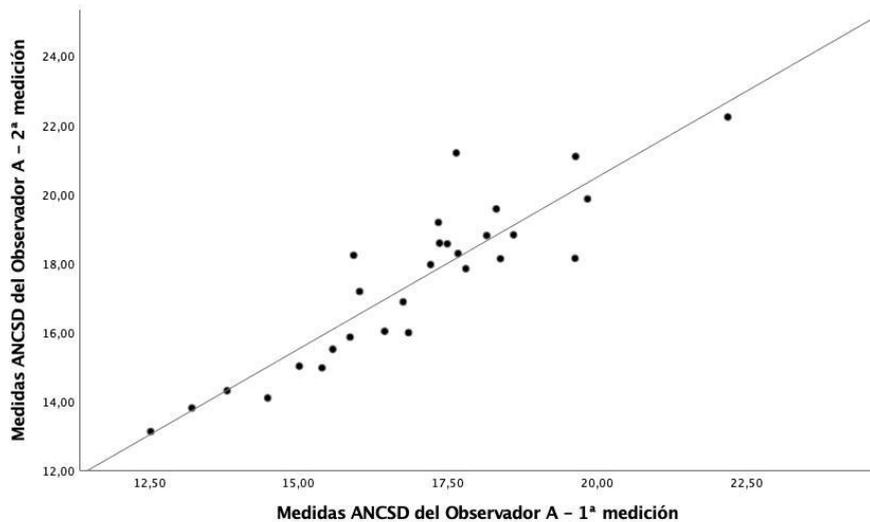


Figura 7.21. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANCSA, tomadas por el observador A.

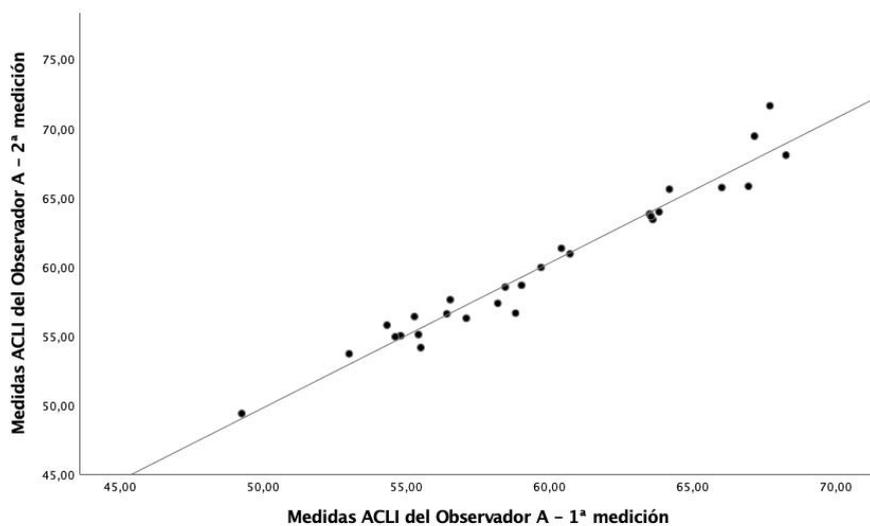


Figura 7.22. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACLI, tomadas por el observador A.

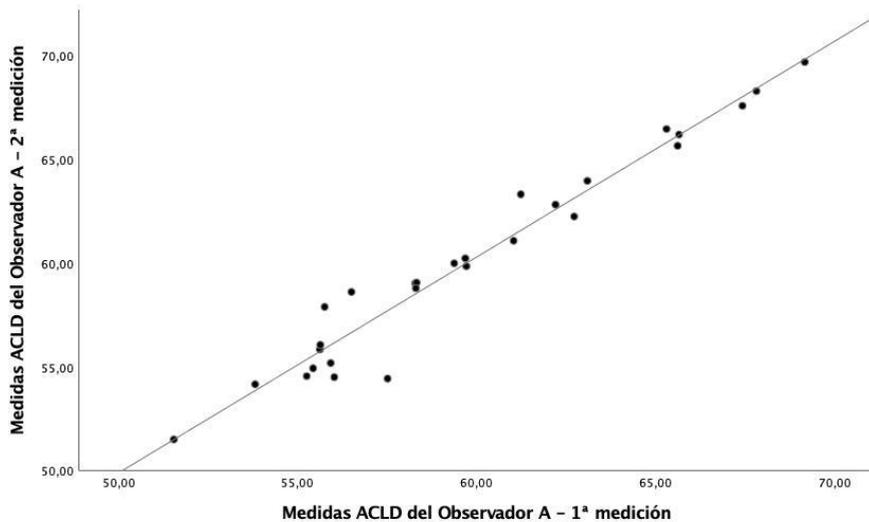


Figura 7.23. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACLD, tomadas por el observador A.

### 7.1.2.2. Análisis de error interobservador

Las Figuras 7.24 a 7.46 muestran los gráficos correspondientes a los resultados del análisis del coeficiente de correlación de concordancia de Lin (CCC). El eje y corresponde a las mediciones tomadas por el observador B. El eje x ilustra las mediciones tomadas por el observador A durante la primera sesión de mediciones. La línea continua que se muestra en los gráficos corresponde a la línea de ajuste total para ambas mediciones.

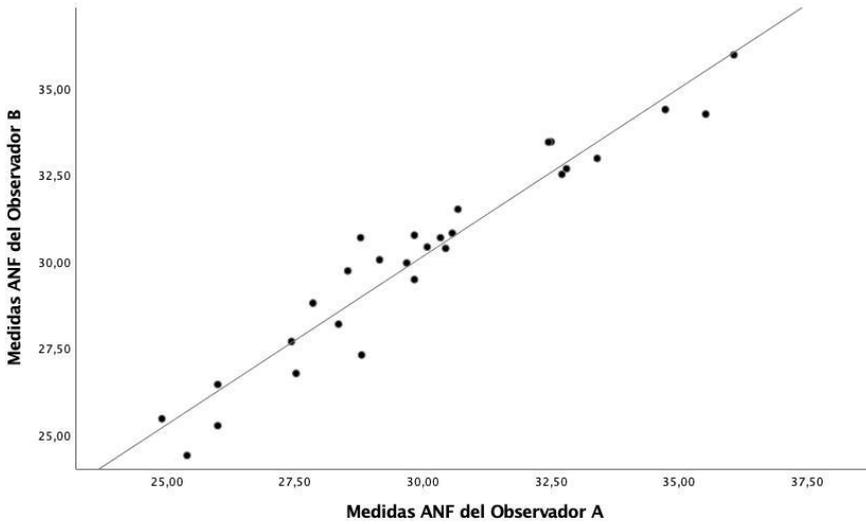


Figura 7.24. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANF, tomadas por el ambos observadores.

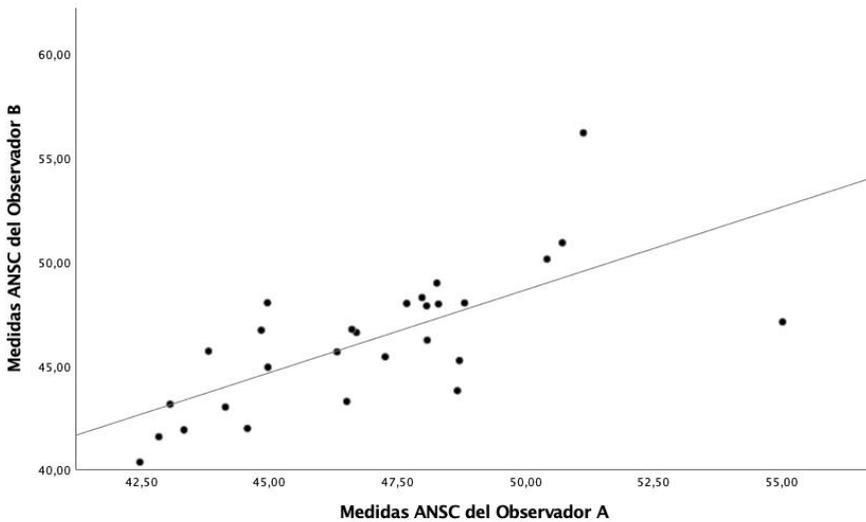


Figura 7.25. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANSC, tomadas por el ambos observadores.

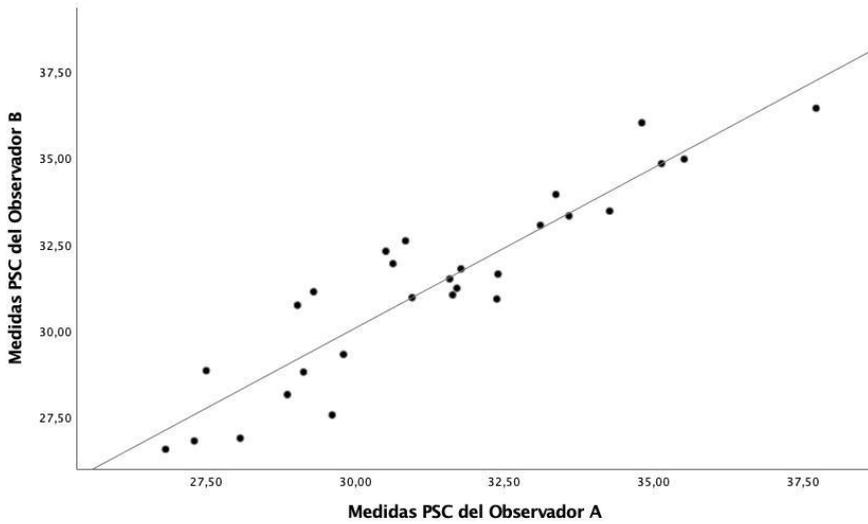


Figura 7.26. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones PSC, tomadas por el ambos observadores.

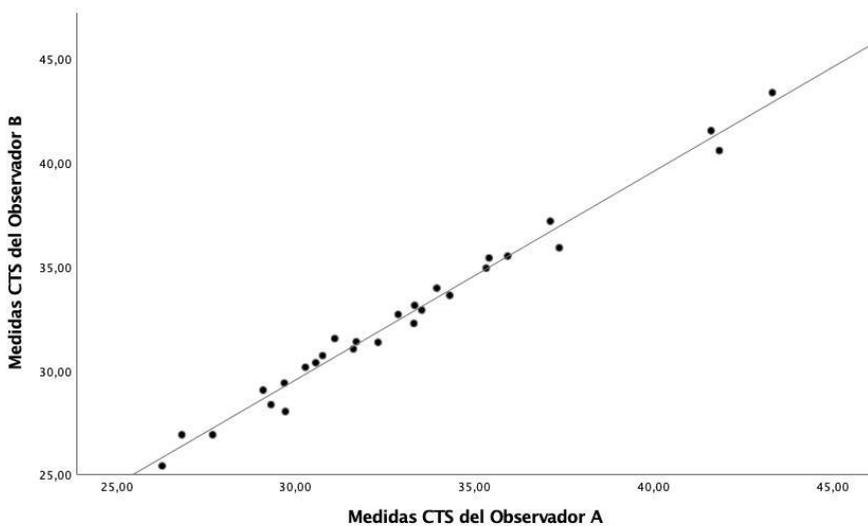


Figura 7.27. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTS, tomadas por el ambos observadores.

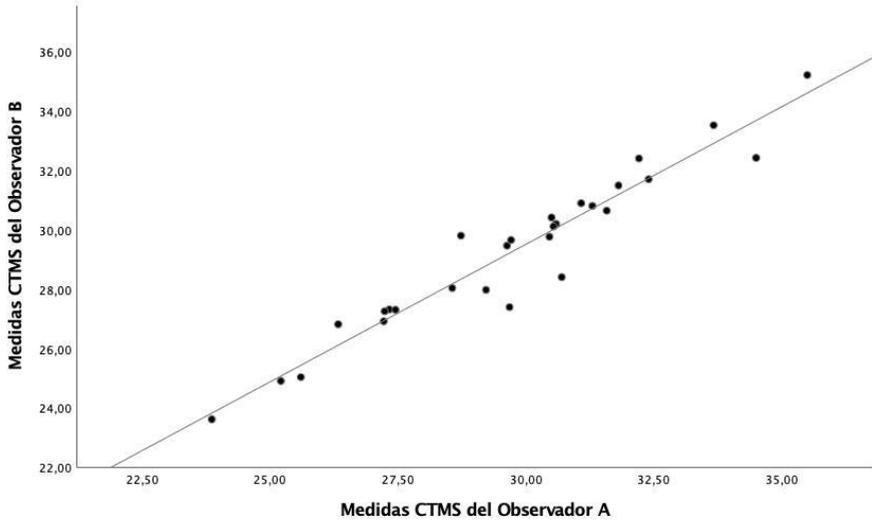


Figura 7.28. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTMS, tomadas por el ambos observadores.

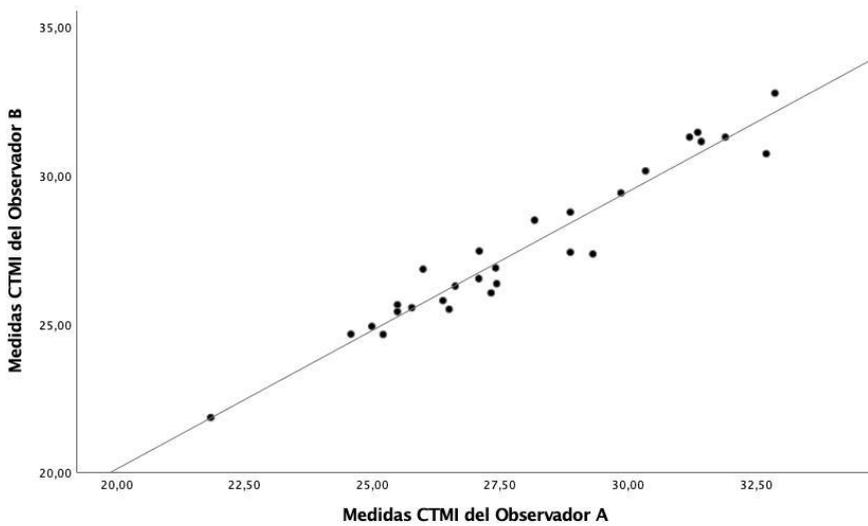


Figura 7.29. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTMI, tomadas por el ambos observadores.

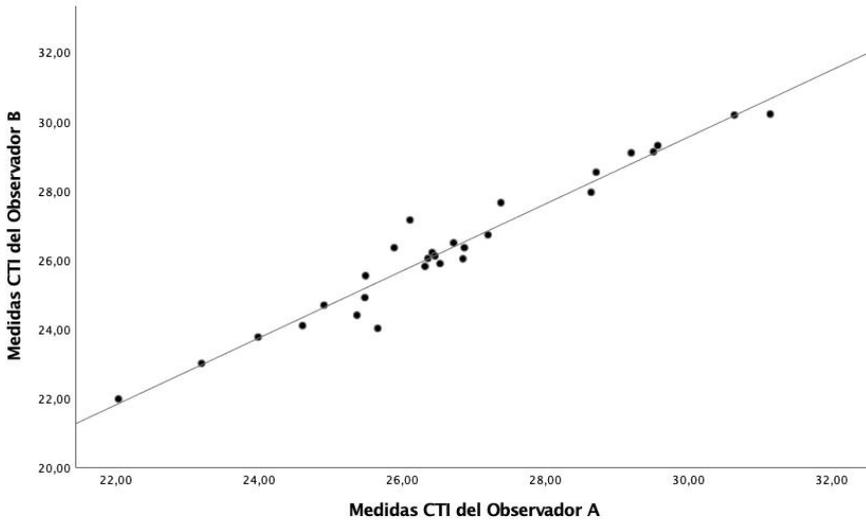


Figura 7.30. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CTI, tomadas por el ambos observadores.

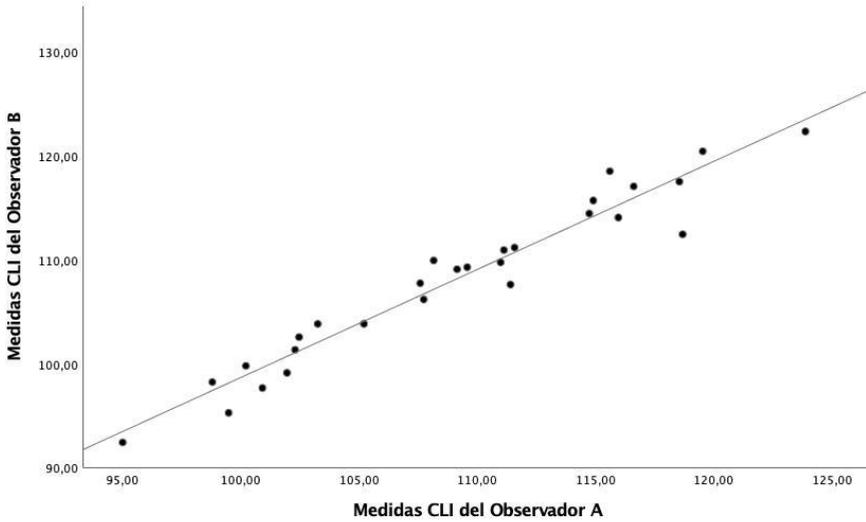


Figura 7.31. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CLI, tomadas por el ambos observadores.

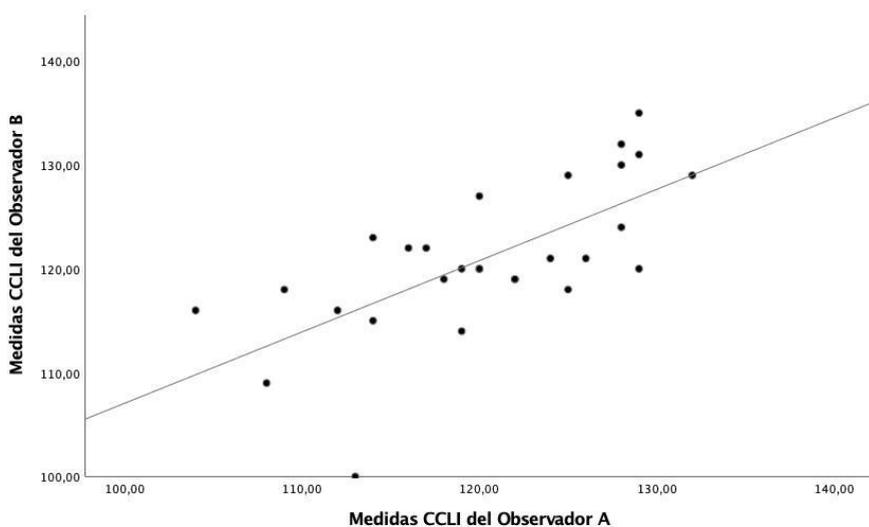


Figura 7.32. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CCLI, tomadas por el ambos observadores.

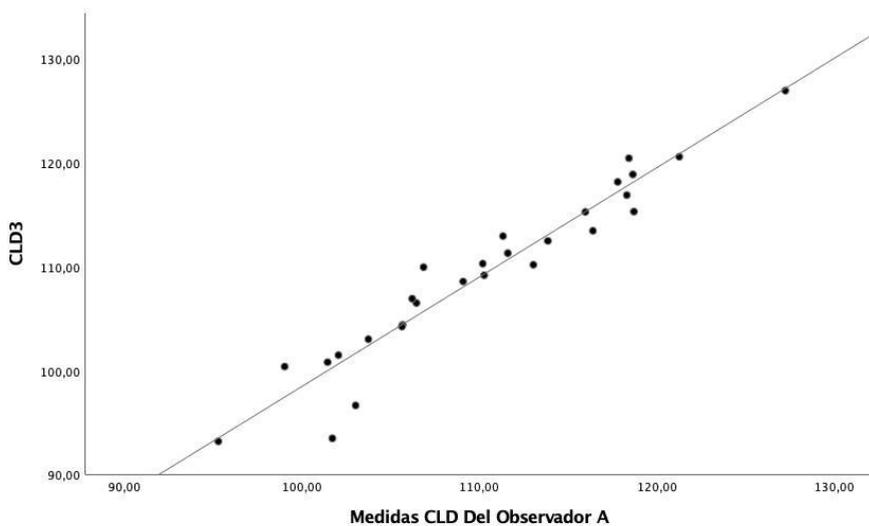


Figura 7.33. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CLD, tomadas por el ambos observadores.

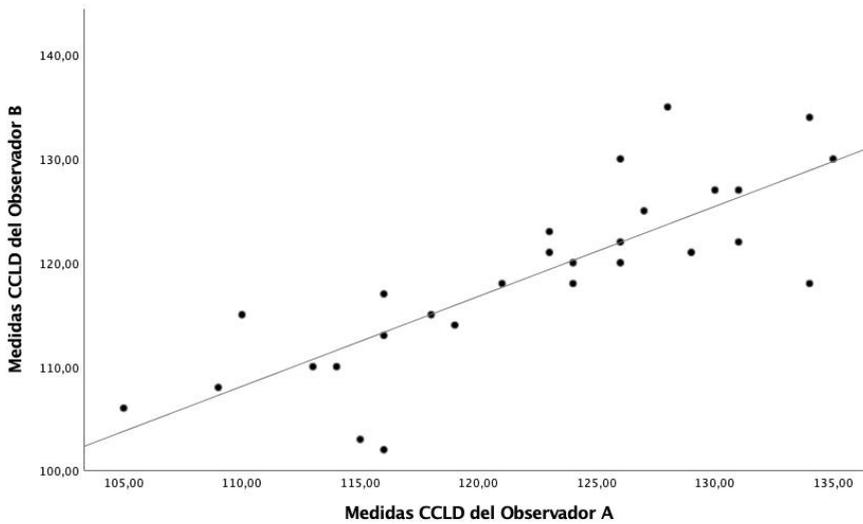


Figura 7.34. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CCLD, tomadas por el ambos observadores.

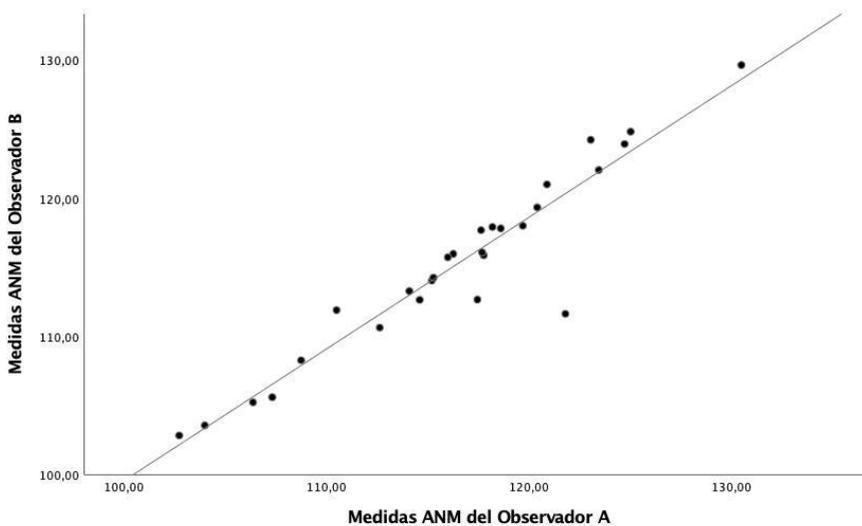


Figura 7.35. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANM, tomadas por el ambos observadores.

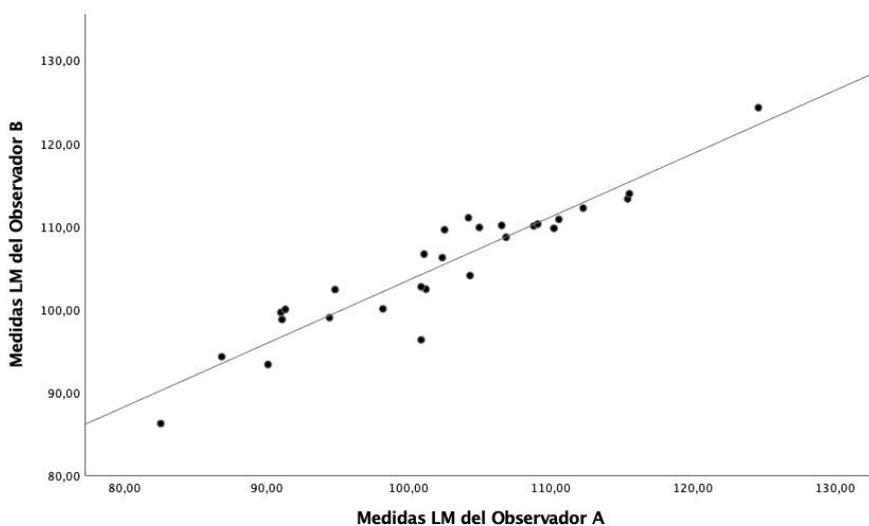


Figura 7.36. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones LM, tomadas por el ambos observadores.

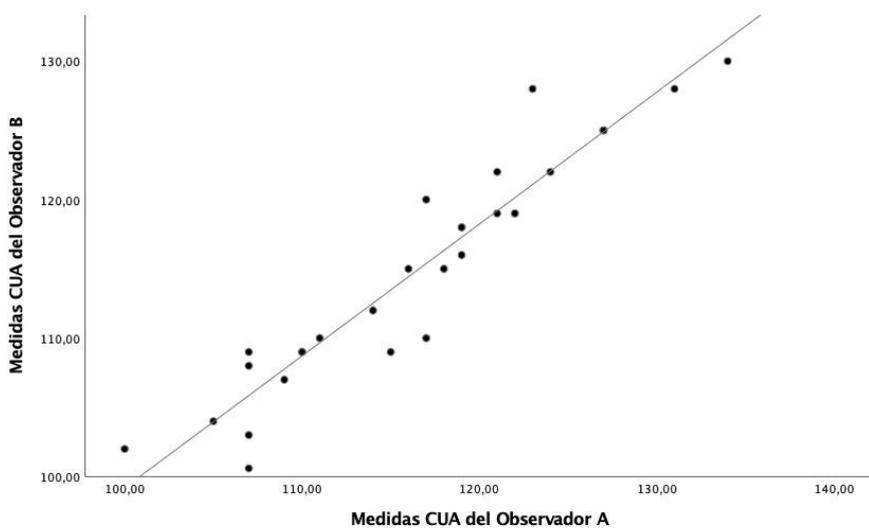


Figura 7.37. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones CUA, tomadas por el ambos observadores.

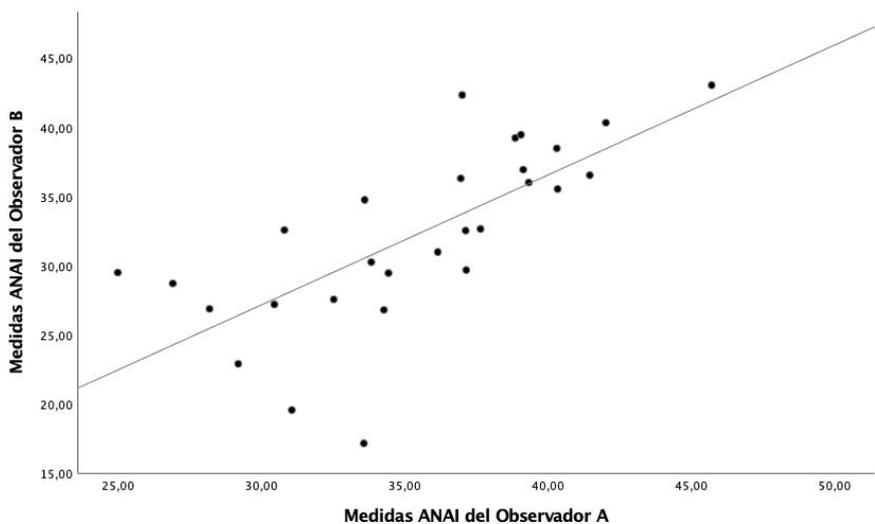


Figura 7.38. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANAI, tomadas por el ambos observadores.

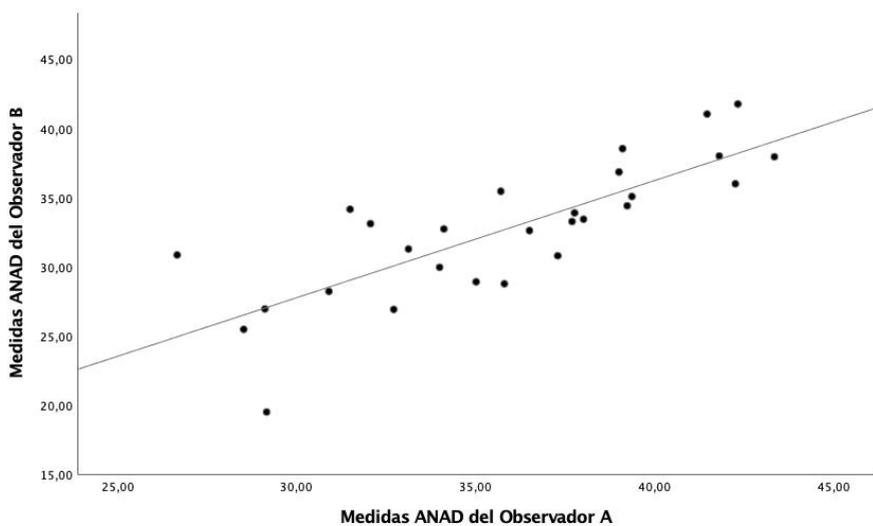


Figura 7.39. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANAD, tomadas por el ambos observadores.

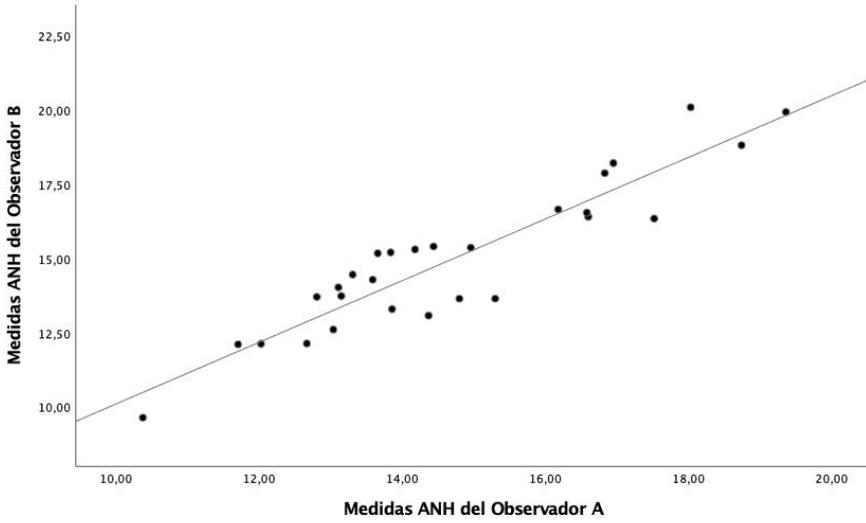


Figura 7.40. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANH, tomadas por el ambos observadores.

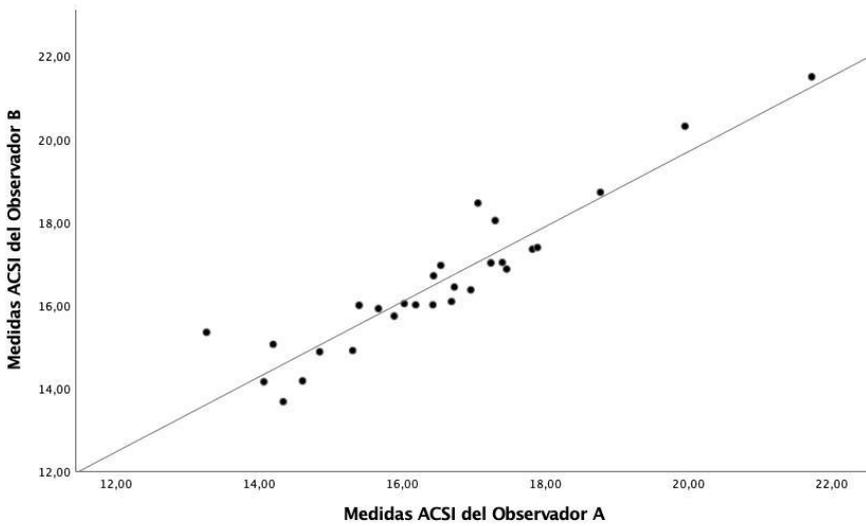


Figura 7.41. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACSI, tomadas por el ambos observadores.

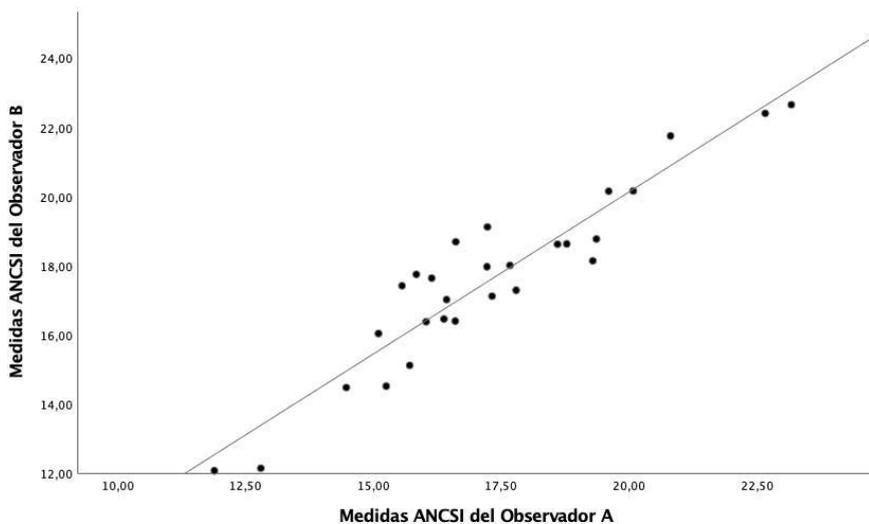


Figura 7.42. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANCSI, tomadas por el ambos observadores.

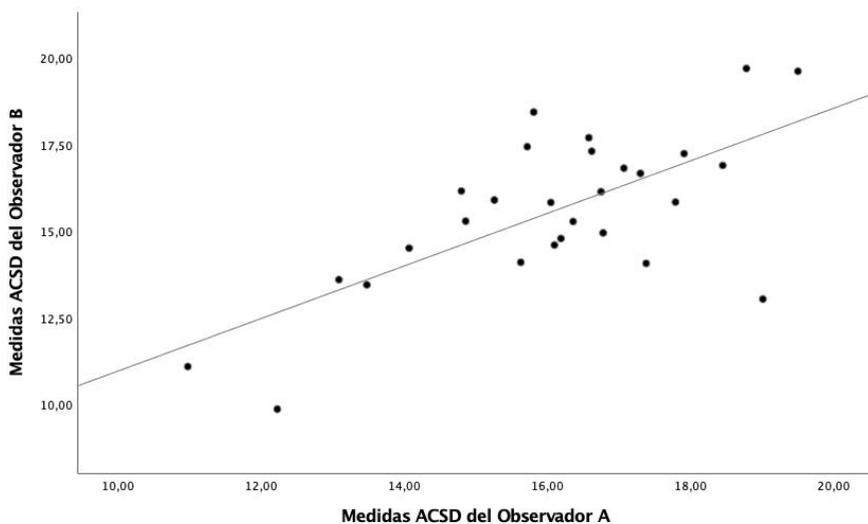


Figura 7.43. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACSD, tomadas por el ambos observadores.

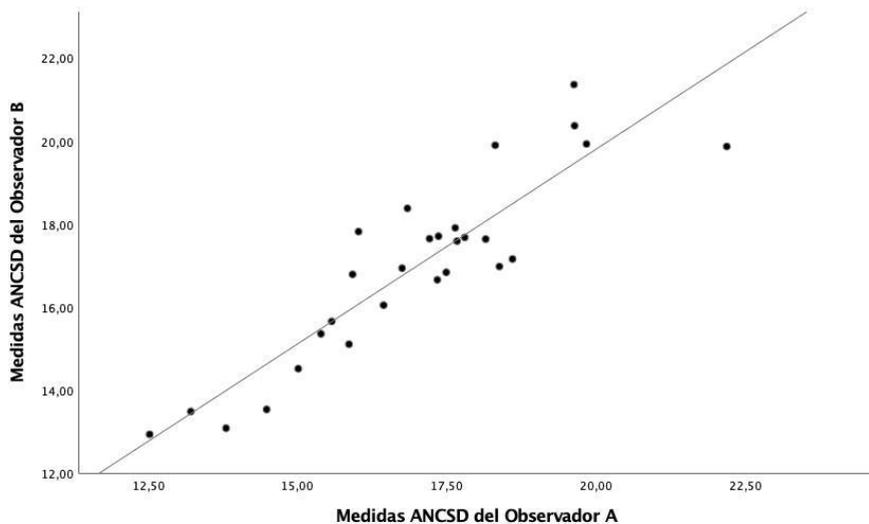


Figura 7.44. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ANCSO, tomadas por el ambos observadores.

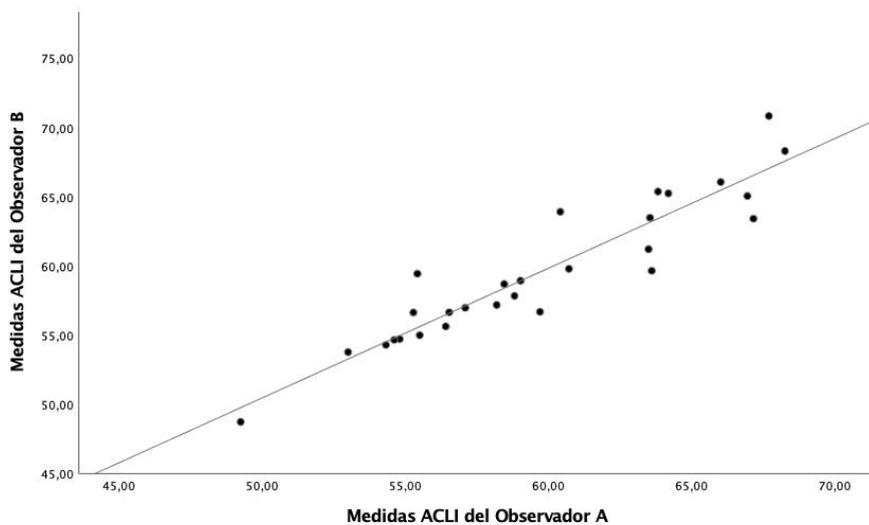


Figura 7.45. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACLI, tomadas por el ambos observadores.

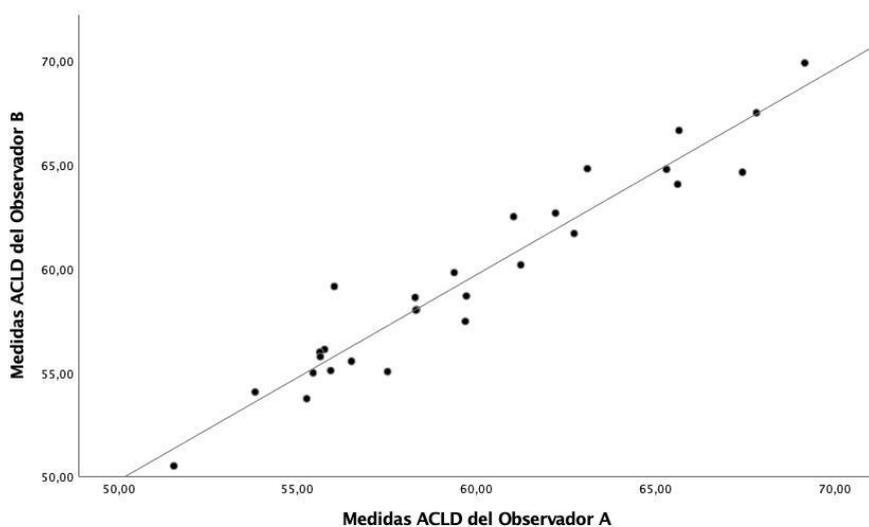


Figura 7.46. Coeficiente de Correlación de Concordancia de Lin. Análisis de concordancia de las mediciones ACLD, tomadas por el ambos observadores.

### 7.1.2.3. Análisis de Concordancia de las observaciones

La tabla 7.1 muestra los datos obtenidos tras el estudio del coeficiente de correlación de concordancia para las mediciones tomadas por el observador A y el observador B.

Tabla 7.1. Resultados del grado de concordancia según el valor de coeficiente de correlación de concordancia de Linn

| Variables | Observador 1 – 2ª medición |            | Observador 2 |            |
|-----------|----------------------------|------------|--------------|------------|
| ANF       | 0,95                       | Sustancial | 0,93         | Moderado   |
| ANSC      | 0,82                       | Pobre      | 0,65         | Pobre      |
| PSC       | 0,68                       | Pobre      | 0,65         | Pobre      |
| CTS       | 0,96                       | Sustancial | 0,95         | Sustancial |
| CTMS      | 0,96                       | Sustancial | 0,92         | Moderado   |
| CTMI      | 0,95                       | Sustancial | 0,92         | Moderado   |
| CTI       | 0,93                       | Moderado   | 0,93         | Moderado   |
| CLI       | 0,91                       | Moderado   | 0,93         | Moderado   |
| CCLI      | 0,75                       | Pobre      | 0,66         | Pobre      |
| CLD       | 0,94                       | Moderado   | 0,92         | Moderado   |
| CCLD      | 0,9                        | Moderado   | 0,72         | Pobre      |
| ANM       | 0,94                       | Moderado   | 0,94         | Moderado   |
| LM        | 0,95                       | Sustancial | 0,91         | Moderado   |
| CUA       | 0,88                       | Pobre      | 0,74         | Pobre      |
| ANAI      | 0,87                       | Pobre      | 0,61         | Pobre      |
| ANAD      | 0,79                       | Pobre      | 0,63         | Pobre      |

Tabla 7.1. Resultados del grado de concordancia según el valor de coeficiente de correlación de concordancia de Linn (continuación)

|       |      |          |      |          |
|-------|------|----------|------|----------|
| ANH   | 0,87 | Pobre    | 0.87 | Pobre    |
| ACIS  | 0,91 | Moderado | 0.90 | Moderado |
| A1CIS | 0,87 | Pobre    | 0.89 | Pobre    |
| ACDS  | 0,75 | Pobre    | 0.65 | Pobre    |
| A1CDS | 0,84 | Pobre    | 0.64 | Pobre    |
| ACLI  | 0,94 | Moderado | 0.91 | Moderado |
| ACLD  | 0,94 | Moderado | 0.93 | Moderado |

En relación con el estudio del error inter e intraobservador, la diferencia de las medias muestra una baja concordancia en algunas medidas, abarcando desde pobre a sustancial; mientras que algunas de esas medidas habían sido definidas previamente (Wilder 1920), otras fueron creadas específicamente para este estudio con el fin de realizar un análisis más exhaustivo del sacro. En el análisis intraobservador se obtienen, a nivel general, mejores resultados que en el interobservador.

Sin embargo, existe una dificultad en la interpretación del CCC con relación al concepto de hipótesis nula para este tipo de estudio. La hipótesis nula  $-H_0$ : concordancia igual a cero- carece de sentido ya que, si se llegara a rechazar la hipótesis nula, se concluiría que la concordancia no es cero y, por tanto, que los datos no son independientes y que la discordancia no es

total. Si no se rechaza la hipótesis nula se podría llegar a concluir que ha habido errores en la medición, o que el tamaño muestral es pequeño (Viciano, 2012).

Por eso, se recomienda plantear el contraste de hipótesis a una sola cola, donde se establece el valor mínimo de concordancia, que se quiere evaluar o se considera el mínimo aceptable entre medidas repetidas para un mismo sujeto. No obstante, el problema está en la fijación de dicho límite, el cual debería de ajustarse en cada caso al más aceptado por la comunidad científica o a la referencia teórica existente (Cortés-Reyes et al., 2010).

En el presente estudio, el segundo observador tenía experiencia previa en antropometría pero no en el hueso estudiado. Por ello, las diferencias entre las mediciones se pueden atribuir a la dificultad de medir el sacro sin experiencia previa. Las fuentes de variación incluyen: (1) variación atribuida al investigador, (2) variación atribuida al instrumento de medida, (3) variación atribuida al propio hueso sacro.

Por consiguiente, se espera que (i) las medidas propuestas mejoren la precisión a nivel metodológico mediante la estandarización del procedimiento de toma de medidas incluyendo una correcta valoración de los factores limitantes y una correcta definición de los puntos de referencia para tomar las medidas, y (ii) un mínimo entrenamiento por parte de los investigadores para localizar los puntos definidos.

### 7.1.3. Análisis descriptivo

Con el fin de minimizar el volumen de datos el análisis descriptivo se realizó una vez conocidas aquellas variables reproducibles y concordantes. Las variables que no cumplieron los requisitos de concordancia fueron excluidas del análisis.

De forma previa a cualquier otro análisis se realizó un análisis descriptivo para conocer las características de la muestra utilizada para el desarrollo de las fórmulas de regresión. Este análisis incluye el tamaño de la muestra, la media, la desviación estándar y los valores máximo y mínimo. Se puede observar que los valores medios masculinos son mayores que los femeninos en todos los parámetros analizados.

### 7.1.4. Análisis de Normalidad y homocedasticidad

La prueba de Kolmogorov-Smirnov mostró que las mediciones siguen una distribución normal, salvo la Cresta Transversa Inferior ( $p \leq 0.05$ ).

Los resultados de la homogeneidad de las varianzas (prueba de Levene) indicaron que la muestra es homogénea al suponer varianzas iguales.

### 7.1.5. Análisis de dimorfismo sexual

En la tabla 7.2 se recogen, junto a los parámetros descriptivos, de acuerdo con la pertenencia al grupo de varones y al de mujeres, el grado de significación de las diferencias entre medias tras el análisis de la t de Student. Todas las variables mostraron diferencias significativas salvo la anchura máxima del sacro y la altura de la faceta auricular izquierda.

Tabla 7.2. Análisis descriptivo de las variables y t-test.

| Medidas | Hombres |          |         | Mujeres |          |          | p            |
|---------|---------|----------|---------|---------|----------|----------|--------------|
|         | N       | Medias   | DE      | N       | Medias   | DE       |              |
| ANF     | 97      | 31.1179  | 3.07364 | 69      | 29.3594  | 3.61074  | 0,001        |
| CTS     | 98      | 32.7646  | 3.30288 | 71      | 29.3297  | 2.85099  | 0,000        |
| CTMS    | 99      | 30.0669  | 3.95957 | 70      | 27.3684  | 2.38934  | 0,000        |
| CTMI    | 99      | 28.4879  | 2.63444 | 71      | 25.8270  | 2.79384  | 0,000        |
| CTI     | 99      | 27.8893  | 6.6266  | 71      | 24.9735  | 2.06033  | 0,000        |
| CLI     | 89      | 108.8115 | 9.15536 | 58      | 100.105  | 8.79498  | 0,000        |
| CLD     | 87      | 110.1117 | 8.88904 | 59      | 101.2692 | 8.38592  | 0,000        |
| ANM     | 94      | 114.7362 | 7.09849 | 70      | 113.9326 | 6.95846  | <b>0,471</b> |
| LM      | 95      | 104.0963 | 9.94773 | 69      | 96.0548  | 11.33037 | 0,000        |

Tabla 7.2. Análisis descriptivo de las variables y t-test. (continuación)

|      |    |         |         |    |         |         |              |
|------|----|---------|---------|----|---------|---------|--------------|
| ACIS | 97 | 16.2298 | 1.81276 | 69 | 16.1748 | 2.32551 | <b>0,864</b> |
| ACLI | 95 | 60.8552 | 5.24953 | 70 | 55.4317 | 4.78816 | 0,000        |
| ACLD | 94 | 61.0034 | 5.40765 | 68 | 55.6265 | 4.76050 | 0,000        |

N número de individuos; DE desviación estándar; p significación

#### 7.1.5.1 Análisis de Regresión Logística Binaria

Finalmente, excluyendo las variables que no mostraron diferencias significativas, se realizó el análisis de regresión logística binaria con el fin de establecer fórmulas de estimación de sexo.

En primer lugar, se analizaron todas las mediciones de forma individual con la finalidad de conocer cuáles de ellas tienen un mayor poder discriminante.

Tabla 7.3. Ecuaciones de regresión logística en análisis univariado

|      |                         |
|------|-------------------------|
| ANF  | L1: 4,629 – 0,164(ANF)  |
| CTS  | L2: 11,812 – 0,393(CTS) |
| CTMS | L3: 8,543 – 0,308(CTMS) |

Tabla 7.3. Ecuaciones de regresión logística en análisis univariado (continuación)

---

|      |                           |
|------|---------------------------|
| CTMI | L4: 10,105 – 0,385(CTMI)  |
| CTI  | L5: 11,529 – 0,454(CTI)   |
| CLI  | L6: 11,070 – 0,110(CLI)   |
| CLD  | L7: 13,029 – 0,127(CLD)   |
| LM   | L8: 7,028 – 0,073(LM)     |
| ACLI | L9: 12,569 – 0,222(ACLI)  |
| ACLD | L10: 12,682 – 0,224(ACLD) |

---

Posteriormente, se realizó un análisis multivariante en el que se incluyen las variables en función de su Razón de Verosimilitud, es decir, según su poder discriminante. De esta forma, el paquete estadístico aportó tres pasos en los que se van incluyendo variables hasta que, por más que se incluyan, el resultado obtenido no mejora al anterior.

Tabla 7.4. Ecuaciones de regresión logística en análisis multivariado por método: Adelante (LR)

---

|        |   |
|--------|---|
| Paso 1 | L11: 14,352 – 0,477(CTS)                            |
| Paso 2 | L12: 22,011 – 0,395(CTS) – 0,097(CLD)               |
| Paso 3 | L13: 23,824 – 0,350(CTS) – 0,068(CLD) – 0,106(ACLD) |

Para obtener por tanto el sexo de un individuo en base a estas fórmulas se ha de multiplicar el valor de cada medida incluida en la fórmula

por un coeficiente; al valor resultante ha de sumarse la constante. Esto se considera dentro del valor exponencial de la función logística.

$$pf = \frac{1}{1 + e^{-(Ln)}}$$

El resultado de esta función se corresponde con la probabilidad de ese individuo para ser femenino –considerando el punto de corte en 0,5-. Así, la probabilidad exacta de ser masculino se obtiene con la fórmula:

$$pm = 1 - pf$$

Por ejemplo, si se mide la cresta transversa superior (CTS = 32,63 mm.) y la cresta lateral derecha (CLD = 98,21 mm.) de un individuo de sexo desconocido, perteneciente a la colección de San José, el sexo se puede estimar si se aplica la fórmula del paso 2 (L12). El procedimiento sería el siguiente:

$$pf = \frac{1}{1 + e^{-(22,011 - (0,395 \times 32,63) - (0,097 \times 98,21))}} = 0,4003$$

Este valor es menor al punto de corte (0,5) así que el individuo se clasificaría como masculino con una probabilidad del 59,97%.

La fiabilidad de esta estimación depende de los porcentajes de asignación correcta que aporta el paquete estadístico en el análisis de regresión, representados en las tablas 9.5 y 9.6. Dichos porcentajes se

ponderaron con la finalidad de homogeneizar los resultados, simulando una población ficticia en la que la proporción de individuos masculinos y femeninos es la misma.

El análisis de regresión logística revela que el sacro puede alcanzar unos buenos niveles de discriminación sexual. Las variables utilizadas en las ecuaciones de regresión y que resultan ser más dimórficas son la cresta transversa superior, la cresta lateral derecha y la faceta articular derecha, cuando el análisis es multivariado, con rangos de 77.26 a 81.41%.

Albanese (2003) publicó una descripción de este método sugiriendo métodos para evaluar la concordancia entre el modelo logístico y los datos utilizados. Pese a que la regresión no es muy utilizada para el análisis discriminante del sexo, es útil porque es menos sensible a altas correlaciones y no requiere una distribución normal de la muestra. A todo ello se suma que el análisis de regresión es más flexible en sus supuestos.

Tabla 7.5. Porcentajes de clasificación correcta para las ecuaciones de regresión en el análisis univariado.

| Ecuaciones | N   | Real   | Estimado |       | Porcentaje |        | Total  |
|------------|-----|--------|----------|-------|------------|--------|--------|
|            |     |        | Hombre   | Mujer | Hombre     | Mujer  |        |
| L1         | 166 | Hombre | 81       | 16    | 55.89%     | 74.47% | 65.18% |
|            |     | Mujer  | 43       | 26    |            |        |        |
| L2         | 169 | Hombre | 79       | 19    | 65.50%     | 84.22% | 74.86% |
|            |     | Mujer  | 25       | 46    |            |        |        |
| L3         | 169 | Hombre | 82       | 17    | 63.63%     | 85.93% | 74.78% |
|            |     | Mujer  | 28       | 42    |            |        |        |
| L4         | 170 | Hombre | 75       | 24    | 63.76%     | 78.08% | 70.92% |
|            |     | Mujer  | 26       | 45    |            |        |        |
| L5         | 170 | Hombre | 75       | 24    | 59.62%     | 73.38% | 66.50% |
|            |     | Mujer  | 33       | 38    |            |        |        |
| L6         | 147 | Hombre | 71       | 18    | 58.63%     | 78.19% | 68.43% |
|            |     | Mujer  | 29       | 29    |            |        |        |
| L7         | 146 | Hombre | 68       | 19    | 64.84%     | 83.20% | 74.02% |
|            |     | Mujer  | 20       | 39    |            |        |        |
| L8         | 164 | Hombre | 77       | 18    | 59.34%     | 77.70% | 68.52% |
|            |     | Mujer  | 35       | 34    |            |        |        |

Tabla 7.5. Porcentajes de clasificación correcta para las ecuaciones de regresión en el análisis univariado. (continuación)

|     |     |        |    |    |        |        |        |
|-----|-----|--------|----|----|--------|--------|--------|
| L9  | 165 | Hombre | 72 | 23 | 62.53% | 76.15% | 69.34% |
|     |     | Mujer  | 28 | 42 |        |        |        |
| L10 | 162 | Hombre | 70 | 24 | 61.55% | 74.45% | 67.99% |
|     |     | Mujer  | 28 | 40 |        |        |        |

N: número de individuos

Tabla 7.6. Porcentajes de clasificación para las ecuaciones de regresión logística en el análisis multivariado por el método: Adelante (Razón de Verosimilitud).

| Ecuaciones | N   | Real   | Estimado |       | Porcentaje |        | Total  |
|------------|-----|--------|----------|-------|------------|--------|--------|
|            |     |        | Hombre   | Mujer | Hombre     | Mujer  |        |
| L11        | 130 | Hombre | 66       | 13    | 63.89%     | 90.63% | 77.26% |
|            |     | Mujer  | 19       | 32    |            |        |        |
| L12        | 130 | Hombre | 67       | 12    | 67.23%     | 95.59% | 81.41% |
|            |     | Mujer  | 15       | 36    |            |        |        |
| L13        | 130 | Hombre | 67       | 12    | 66.42%     | 94.91% | 80.66% |
|            |     | Mujer  | 16       | 35    |            |        |        |

N: número de individuos

Para realizar la regresión logística, diversos autores han abierto el debate sobre el número recomendado de eventos por variable (EPV). Vittinghoff y McCulloch (2007) proponen un mínimo de 5 eventos, Harrell et al. (1996) recomiendan entre 10 y 20 EPV, mientras que Peduzzi et al. (1996) concluyen necesarios entre 5 y 10 EPV. Por otro lado, Courvoisier et al. (2011) estudiaron que no hay una única regla para estimar el número exacto de EPV.

Aunque las ecuaciones de regresión logísticas están construidas con una o dos variables explicativas, el número de eventos por variable explicativa es igual o superior al rango recomendado por los diferentes autores. No obstante, el consenso queda en utilizar preferentemente muestras más amplias y la mayor cantidad de EPV posibles.

Nuestro estudio indica la importancia del sacro como estructura dimórfica por sí misma. En 10 de las 12 medidas estudiadas se ha encontrado un dimorfismo sexual significativo que posteriormente se ha reflejado en las ecuaciones desarrolladas.

El método utilizado para el análisis multivariado muestra que las variables más dimórficas son la cresta transversa superior y la cresta lateral derecha, quedando esto reflejado en L12 donde se alcanza un porcentaje de acierto del 81.41%. Sin embargo, L13 muestra que este porcentaje no mejora, sino que empeora, cuando se añade una tercera variable a la ecuación.

Referido al análisis univariado, el estudio por separado de cada una de las variables definidas previamente muestra que las crestas transversas y la cresta lateral derecha son las que mejor tasa de acierto muestran, siendo ésta superior a 74% en el total.

Además, este análisis muestra que la tasa de acierto con los porcentajes ponderados es superior en las mujeres que en los hombres, lo que implica que, en una muestra homogénea, las mujeres serán mejor clasificadas. Las variables establecidas como más dimórficas, tanto en el estudio univariado como en el estudio multivariado, son la cresta transversa superior (CTS) y la cresta lateral derecha (CLD). Ambas variables son características de la anchura y la altura del sacro.

La primera variable concuerda con la base del cuerpo de S1 en su unión con S2 y esto se relaciona con los resultados obtenidos por Flanders (1978) y Rusk (2016) en los cuales se indica que S1 tiene una parte sustancial en el dimorfismo sexual. La segunda variable destacada en este estudio se relaciona estrechamente con los resultados de Steyn (2008) y Kimura (1982) en los que se indica que la longitud del sacro también aporta resultados positivos en el análisis del dimorfismo sexual.

Tawald et. al (2013) realizaron un estudio comparativo métrico del sacro entre la población india, diferenciada entre el Norte y el Sur de dicha región, llegando a porcentajes de clasificación entre 89 y 90% entre

hombres y mujeres respectivamente. Sin embargo, establecen una única fórmula diferenciada entre sexos que incluye 7 mediciones distintas, algunas de ellas utilizadas en este estudio. El principal problema es que si una de ellas no puede ser obtenida, las fórmulas no pueden ser utilizadas.

Por contrario, en este estudio se establecen 13 ecuaciones diferentes, con solo 3 de ellas obtenidas mediante análisis multivariado, es decir, usando más de una variable; lo cual permite mayor flexibilidad de aplicación si no se puede tomar alguna de las variables definidas.

Los porcentajes de clasificación obtenidos en este estudio son similares a los de otros autores como Flander (1978), Plochoki (2011), Steyn (2008), Kimura (1982) o Fawcet (1938). Sin embargo, cada uno de ellos propone unas fórmulas discriminantes diferentes entre sí, estableciendo distintas variables como más discriminantes. Todos ellos utilizan el análisis univariado y el análisis multivariado, siendo preferente este último por la mejora que produce en los resultados.

Entre estos autores, también se destaca el uso de índices para el análisis discriminante del sacro. Principalmente, se hace uso del índice sacro descrito por Wilder (1920) en el que se relacionan anchura y altura.

Autores como Ravichandran (2013), Mishra (2003) o Arora (2010) estudiaron poblaciones indias y propusieron la utilización de *Demarking Points* para determinar el sexo utilizando el sacro. Mediante este método

han conseguido un 100% de exactitud en la determinación del sexo utilizando la totalidad de índices y variables que estudian.

Finalmente, mediante este análisis se establece que tanto la longitud del sacro, establecida en la cresta lateral derecha, como la anchura del mismo, relacionada con la cresta transversa superior y la cresta transversa medio-superior, pueden aportar tasas de acierto superiores al 74% en el momento de la estimación del sexo en un individuo.

Considerando los porcentajes de clasificación correcta –a nivel general- en este análisis, se recomienda utilizar estas ecuaciones como un elemento de apoyo junto con otras metodologías en la estimación del sexo de los individuos.

## 7.2. Análisis de la curvatura sacra mediante morfometría geométrica

### 7.2.1. Composición final de la muestra

Teniendo en cuenta la valoración de los factores limitantes y, por ende, la exclusión de los individuos afectados por los mismos –incluyendo la ausencia de sacro, o cambios en su morfología relacionados con su conservación- la muestra de este análisis está compuesta por 130 individuos adultos -71 hombres y 59 mujeres- de la colección de San José. Debido a los filtros por los que pasan los sacros para ser incluidos en el estudio, el tamaño muestral se vio reducido.

### 7.2.2. Análisis de reproducibilidad y concordancia

La tabla 7.7 muestra la concordancia entre las observaciones llevadas a cabo por un solo observador. En este caso, la concordancia entre las coordenadas de los *landmarks* y *semilandmarks* tiene un acuerdo clasificado como excelente, con rangos entre 0,892 y 0,974 en el caso de los *landmarks* y 0,912 en el caso de los *semilandmarks*.

Tabla 7.7. Análisis del error de observación mediante el coeficiente de correlación intraclase tras la tipificación de los valores originales. Valor de concordancia en la localización de *landmarks* y *semilandmarks* en sacro, un observador.

|          | Valor de la concordancia | Grado de acuerdo |
|----------|--------------------------|------------------|
| LM 1     | 0.952                    | Excelente        |
| LM 2     | 0.892                    | Excelente        |
| LM 3     | 0.974                    | Excelente        |
| SML (29) | 0.912                    | Excelente        |

LM *landmark*, SML *semi-landmark*

La tabla 7.8 muestra la concordancia entre las observaciones de ambos observadores. En este caso, la concordancia entre las coordenadas de los *landmarks* y *semilandmarks* tiene un acuerdo clasificado como excelente, con rangos entre 0,782 y 0,914 en el caso de los *landmarks* y 0,891 en el caso de los *semilandmarks*.

Tabla 7.8. Análisis del error de observación mediante el coeficiente de correlación intraclase tras la tipificación de los valores originales. Valor de concordancia en la localización de *landmarks* y *semilandmarks* en sacro, dos observadores.

|          | Valor de la concordancia | Grado de acuerdo |
|----------|--------------------------|------------------|
| LM 1     | 0.848                    | Excelente        |
| LM 2     | 0.782                    | Excelente        |
| LM 3     | 0.914                    | Excelente        |
| SML (29) | 0.891                    | Excelente        |

LM *landmark*, SML *semi-landmark*

El análisis de reproducibilidad y concordancia se realizó previo al resto de técnicas morfométricas para que las diferencias en la valoración de *landmarks* y *semilandmarks* se relacionara con el método empleado en su localización. El primer *landmark* se colocó en la parte más ventral de la faceta auricular, el segundo en la parte más dorsal de la curvatura (coincidente con el ángulo de esta) y el tercero en la parte lateral izquierda del ápex de S5; mientras que los *semilandmarks* se dispusieron de forma automática y equidistante siguiendo la curva dibujada manualmente entre los *landmarks*.

Los resultados del análisis de concordancia muestran resultados excelentes en la localización de *landmarks* y *semilandmarks* pese a que sean menores los reportados en el análisis interobservador.

Sin embargo, la interpretación de estos valores está sujeta a la subjetividad del investigador ya que es este el que determina la clasificación que se puede emplear. Entre las más utilizadas se encuentran las clasificaciones propuestas por Landis y Koch (1977) y Fleiss (1986).

Debido a la falta de consenso con relación al estándar a utilizar (Shrout, 1998), la interpretación de los valores del coeficiente de correlación intraclase se ve influenciada por (i) el modelo utilizado y (ii) la variabilidad que presenta la muestra (Weir, 2005).

Por tanto, la elección del modelo dependerá de los observadores, la muestra y el objeto de análisis. Así, se hace necesario seleccionar las siguientes alternativas: (i) el análisis de la varianza unidireccional o bidireccional, (ii) el modelo aleatorio o cambiando, (iii) se excluye o incluye el error sistemático, y (iv) medidas únicas o promedio (Weir, 2005; López-Lázaro, 2015).

Por otro lado, si la variabilidad existente entre los sujetos de estudio es baja, el coeficiente de correlación intraclase será bajo, independientemente de que los métodos sean concordantes o no y viceversa (Cortés-Reyes et al., 2010). De esta forma, un valor bajo del coeficiente de

correlación intraclase podría enmascarar buena consistencia si hay poca variabilidad debida a una alta homogeneidad entre los sujetos (Weir, 2005).

En morfometría geométrica se elige el coeficiente de correlación intraclase para valorar la concordancia de las observaciones por la falta de consenso existente.

### 7.2.3. Métodos para el deslizamiento de *semilandmarks*

El objetivo de poder cuantificar el dimorfismo sexual presente en la curvatura sacra justifica el uso de *semilandmarks* en el presente trabajo. El análisis de la curvatura se realizó en dos dimensiones por lo que cada *semilandmark* vendrá definido por dos coordenadas ( $x$ ,  $y$ ); sin embargo, considerando la carencia de un criterio homólogo para su localización tendrá solo un grado de libertad, lo que implica una pérdida de información con respecto a los *landmarks*.

La conversión de un punto en *semilandmark* es lo que se denomina deslizamiento a lo largo de la curva y puede llevarse a cabo mediante diversas metodologías (Gunz y Mitteroecker, 2013). En el presente análisis se optó por la minimización de la energía de torsión, dentro de la teoría de deformación de *thin-plate-spline*. Dicha metodología arroja una descripción visualmente interpretable de las deformaciones de la forma haciendo uso de la información de las coordenadas de *landmarks* (Webster y Sheets, 2010).

La figura 7.47 muestra el deslizamiento de los *semilandmarks* según el método de minimización de energía de torsión.

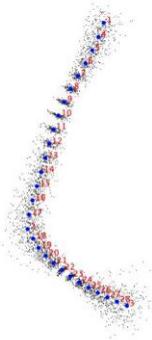


Figura 7.47. Deslizamiento de *landmarks* según el método de minimización de energía de torsión.

Gunz y Mitteroecker (2013) propusieron la minimización de la energía de torsión como solución por (i) basarse en el formalismo del *thin-plate-spline* y porque el deslizamiento de los *semilandmarks* se da de manera conjunta e influenciada por *landmarks* anatómicos.

#### 7.2.4. Análisis del dimorfismo sexual

##### 7.2.4.1. Análisis de Componentes Principales

En nuestro análisis, la varianza se explica por encima del 95% en los cuatro primeros componentes principales.

La figura 7.48, muestra en el eje x, el primer componente principal (que cuenta con la mayor varianza, un 69,24%). Los valores positivos del primer componente principal muestran cómo los *landmarks* y *semilandmarks* de la parte craneal (superior) y de la parte caudal (inferior) tienden a desplazarse hacia la parte posterior (dorsal). Sin embargo, el *landmark* y *semilandmarks* localizados en la parte media del hueso, tienden a desplazarse hacia la parte anterior (ventral). Para los valores negativos, los *landmarks* de las partes proximal y distal tienden a desplazarse hacia la parte anterior mientras que los centrales lo hacen hacia la parte posterior.

El segundo componente principal (que explica el 21,64% de varianza), los *landmarks* de la parte craneal tienden a desplazarse hacia la parte craneal en los valores positivos y hacia la parte caudal en los negativos. Con relación a los valores positivos, los *landmarks* y *semilandmarks* del centro y la parte caudal tienden hacia la parte caudal anterior y craneal posterior respectivamente. Los valores negativos en la parte central muestran tendencia a la parte craneal posterior y tendencia hacia la parte caudal anterior en la parte inferior (final).

Sin embargo, cuando se comprueba el gráfico de dispersión –salvo en algunos valores concretos que quedan alejados- ambos sexos se superponen en ambos ejes, quedando así concentrados en el mismo lugar.

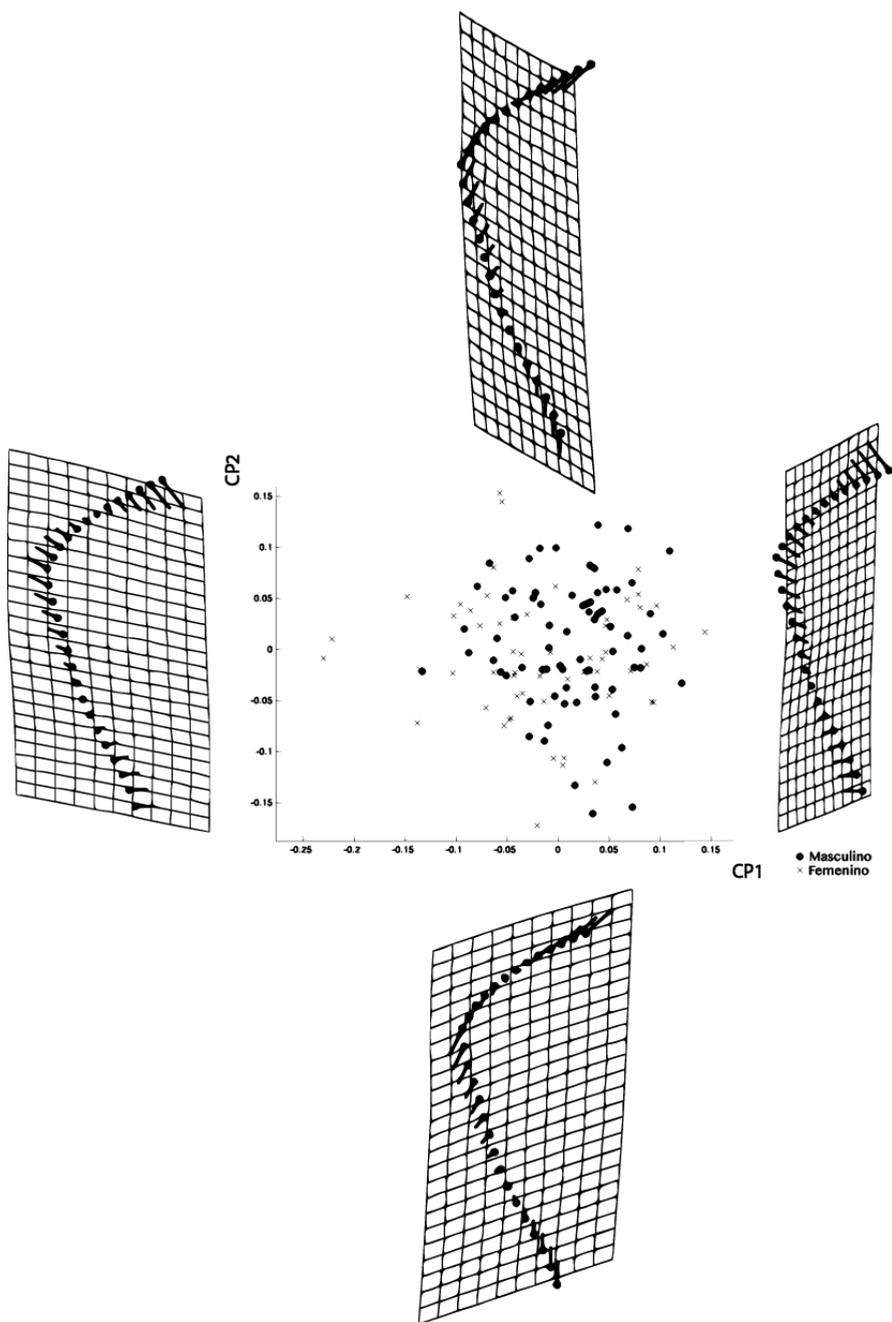


Figura 7.48. Gráfico de dispersión y grillas de deformación para el análisis de componentes principales.

#### 7.2.4.2. Análisis de Variables Canónicas

Con relación a las variables canónicas, los individuos se encuentran dispersos en ambos ejes aunque se observa una mínima tendencia de agrupación de hombres hacia la dirección positiva y de las mujeres hacia la dirección negativa. La distribución de estos valores muestra la forma del sacro. Además, observando las grillas de deformación se ve una tendencia similar a la mostrada en el primer componente principal y subraya las diferencias en la parte caudal/inferior del hueso (Figura 7.49).

#### 7.2.4.3. Análisis de Funciones Discriminantes

Finalmente, se realizó un análisis discriminante de las variables originales como parte de la validación cruzada del método. De esta forma se observa un 73.1% y 69.2% de clasificación correcta para hombres y mujeres respectivamente (Tabla 7.9). Con la finalidad de estudiar el tamaño y la forma, se añadió el centroide como una variable, aumentando los valores a 76.9% [+3.8%] y 75.4% [+6.2%].

El valor de la F de Goodall ( $p \geq 0,05$ ) indica que no hay diferencia en la *forma* de la curvatura del sacro entre sexos. En ambos casos, el valor de la Lambda de Wilks muestra que las variables no tienen poder discriminante por sexo ( $p \geq 0,05$ ; Tablas 9.9 y 9.10).

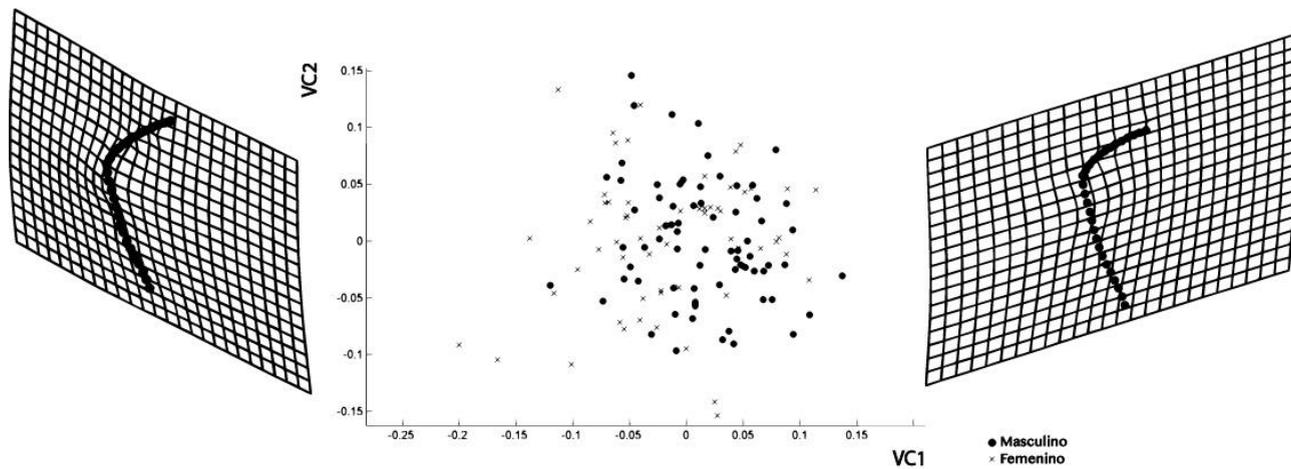


Figura 7.49. Gráfico de dispersión y grillas de deformación en el Análisis de Variables Canónicas.

Tabla 7.9. Resultados del análisis discriminante de variables canónicas y validación cruzada para la *forma*.

| Lambda de Wilks |             | Variables originales |       |                            | Validación cruzada |       |                            |
|-----------------|-------------|----------------------|-------|----------------------------|--------------------|-------|----------------------------|
|                 |             | Hombre               | Mujer | Clasificación correcta (%) | Hombre             | Mujer | Clasificación correcta (%) |
| $\lambda$       | Sig.        |                      |       |                            |                    |       |                            |
| Hombre          |             | 56                   | 15    | 78.9                       | 53                 | 18    | 74.6                       |
| Mujer           | 0.458 0.639 | 39                   | 20    | 66.1                       | 37                 | 22    | 62.7                       |
| Total           |             | 95                   | 35    | 73.1                       | 90                 | 40    | 69.2                       |

Tabla 7.10. Resultados del análisis discriminante de variables canónicas y validación cruzada basado en la *forma* y el tamaño.

| Lambda de Wilks |             | Variables originales |       |                            | Validación cruzada |       |                            |
|-----------------|-------------|----------------------|-------|----------------------------|--------------------|-------|----------------------------|
|                 |             | Hombre               | Mujer | Clasificación correcta (%) | Hombre             | Mujer | Clasificación correcta (%) |
| Hombre          |             | 56                   | 15    | 78.9                       | 54                 | 17    | 76.1                       |
| Mujer           | 0.511 0.396 | 44                   | 15    | 74.6                       | 44                 | 15    | 74.6                       |
| Total           |             | 100                  | 30    | 76.9                       | 98                 | 32    | 75.4                       |

Estudios previos demostraron que, morfológicamente, el sacro, al estar incluido en la pelvis, también tenía poder discriminante. Rogers y Saunders (2014) evaluaron el sacro en su estudio de características pélvicas para determinar el sexo. Morfológicamente demostraron que el mejor indicador, con un 94.1% de clasificación correcta, era la forma evaluada como “largo y estrecho” para los hombres y “corto y ancho” para las mujeres.

Sin embargo, estudios como los de Rusk et al. (2016) y Franklin et al. (2014) han demostrado que el sacro tiene influencia en la forma de la cintura pélvica y que contribuye al dimorfismo sexual. Además, afirman que la curvatura dorsoventral del sacro tiene una utilidad limitada para estimar el sexo por sí misma.

Vollner et al. (2011) utilizaron medidas bidimensionales para realizar un estudio discriminante en sacros alcanzando un 89% de clasificación correcta. Passalacqua et al. (2010) y Vollner et al. (2011) utilizaron *landmarks* y la morfometría geométrica evaluando la parte anterior del sacro, sin estudiar la curva, alcanzando entre el 85.8% y el 89% de clasificación correcta respectivamente. Por otro lado, Benazzi et al. (2009) realizaron también un estudio bidimensional centrándose en el área de la base en población italiana con resultados entre el 81.6% y el 93.2%.

Plochocki et al. (2011) realizó un estudio métrico de la curva del sacro, separado en segmentos en base a las vértebras sacras. Sus resultados indicaron que la curva del hombre era más uniforme, presentándose así

ligeramente (11%) más “profunda” en determinados segmentos respecto a la mujer. Sin embargo, los resultados del análisis discriminante aportaron resultados del 66.3% y 69.4% para hombres y mujeres respectivamente.

En nuestro estudio se demuestra que el método, con todas las limitaciones de la variable –la curvatura sacra-, permite clasificar a los individuos con una precisión del 76.1% en hombres y 74.6% en mujeres tras una validación cruzada. Ambos porcentajes entrarían dentro de los estándares de Daubert (1963) para poder ser usados en pruebas periciales.

Sin embargo, nuestros hallazgos concuerdan con la idea de que la curva del sacro tiene un uso limitado y no permite estimar el sexo de un individuo de forma segura, al no mostrar diferencias significativas entre ambos grupos. Sin embargo, observando las grillas de deformación, en los hombres se mostraría una curva más simétrica y uniforme, frente a las mujeres dónde la curva se ve más pronunciada en la parte inferior del hueso (Plochocki, 2011; Roger y Saunders, 1994).

Por otro lado, nuestro estudio señala la ausencia de poder dimórfico de la curvatura sacra pese a unos buenos porcentajes de clasificación en la validación cruzada. Por ello, estos resultados han de tratarse con mucha cautela hasta que se confirmen con muestras más amplias comprobando la respuesta del valor de la Lambda de Wilks. Actualmente las diferencias entre sexos podrían ser definidas como tendencias hacia una forma determinada.

7.3. Validación de las fórmulas de regresión logística y comparación de poblaciones.

#### 7.3.1. Composición final de la muestra

Para este análisis se contó con las tres colecciones detalladas en el capítulo 7. Tras haber considerado los factores limitantes expuestos previamente en las tres colecciones –o series- se contaba con 291 individuos, de los cuales 167 pertenecían al sexo masculino y 124 al femenino.

#### 7.3.2. Análisis descriptivo

Como primer paso, se realizó un estudio descriptivo de las colecciones que se incluyen en este análisis. La tabla 7.11 muestra el resultado del tamaño muestral, la media, el valor mínimo y máximo, junto con la desviación estándar para el total de individuos incluidos en esta parte del presente trabajo.

Tabla 7.11. Estadística descriptiva de la muestra final

|      | N   | Mínimo | Máximo | Media    | DE       |
|------|-----|--------|--------|----------|----------|
| ANF  | 283 | 21,14  | 41,05  | 30,5487  | 3,21055  |
| CTS  | 290 | 23,02  | 43,31  | 31,7292  | 3,71176  |
| CTMS | 290 | 22,57  | 38,48  | 29,4760  | 3,06156  |
| CTMI | 291 | 21,40  | 38,55  | 27,5845  | 2,96608  |
| CTI  | 289 | 20,30  | 88,76  | 26,8086  | 4,50607  |
| CLI  | 250 | 74,79  | 131,74 | 106,3690 | 9,73687  |
| CLD  | 252 | 80,64  | 134,98 | 107,2124 | 9,36489  |
| LM   | 281 | 64,18  | 128,61 | 100,7930 | 11,26915 |
| ACLI | 279 | 45,22  | 75,92  | 59,2443  | 5,87354  |
| ACLD | 275 | 28,56  | 77,28  | 59,2181  | 6,13100  |

N número de individuos; DE desviación estándar

La tabla 7.12 muestra el resultado del tamaño muestral, la media, el valor máximo y mínimo y la desviación estándar para cada una de las variables en base al sexo.

Tabla 7.12. Análisis descriptivo de la muestral final en base al sexo.

|        |        | <u>ANF</u> | <u>CTS</u> | <u>CTMS</u> | <u>CTMI</u> | <u>CTI</u> | <u>CLI</u> | <u>CLD</u> |
|--------|--------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
| Hombre | Media  | 31,0955    | 33,2190    | 30,7799     | 28,7807     | 27,9603    | 109,4717   | 110,4135   |
|        | N      | 165        | 166        | 167         | 167         | 166        | 148        | 150        |
|        | DE     | 2,98484    | 3,51998    | 2,86317     | 2,70925     | 5,37783    | 8,87396    | 8,54117    |
|        | Mínimo | 21,14      | 25,04      | 22,88       | 21,84       | 21,08      | 83,61      | 91,95      |
|        | Máximo | 39,75      | 43,31      | 38,48       | 35,99       | 88,76      | 131,74     | 134,98     |
| Mujer  | Media  | 29,7840    | 29,7348    | 27,7057     | 25,9735     | 25,2543    | 101,8670   | 102,5048   |
|        | N      | 118        | 124        | 123         | 124         | 123        | 102        | 102        |
|        | DE     | 3,36815    | 2,95706    | 2,35849     | 2,50548     | 2,13946    | 9,19475    | 8,52814    |
|        | Mínimo | 21,68      | 23,02      | 22,57       | 21,40       | 20,30      | 74,79      | 80,64      |
|        | Máximo | 41,05      | 42,58      | 33,65       | 38,55       | 30,02      | 128,04     | 127,48     |

Tabla 7.12. Análisis descriptivo de la muestral final en base al sexo. (continuación)

|        |        | LM       | ACLI    | ACLD    |
|--------|--------|----------|---------|---------|
| Hombre | Media  | 103,5627 | 61,4835 | 61,2815 |
|        | N      | 161      | 161     | 160     |
|        | DE     | 10,53871 | 5,47167 | 6,12760 |
|        | Mínimo | 67,93    | 50,14   | 28,56   |
|        | Máximo | 128,61   | 75,92   | 77,28   |
| Mujer  | Media  | 97,0770  | 56,1890 | 56,3473 |
|        | N      | 120      | 118     | 115     |
|        | DE     | 11,18819 | 4,97128 | 4,86700 |
|        | Mínimo | 64,18    | 45,22   | 40,86   |
|        | Máximo | 121,49   | 68,92   | 67,42   |

N número de individuos; DE Desviación estándar

Debido a que la muestra está compuesta por tres colecciones diferentes, la tabla 7.13 ilustra los resultados del tamaño muestral, la media, el valor mínimo y máximo y la desviación estándar para cada una de las variables separando a los individuos según la colección a la que pertenecen.

Finalmente, las tablas 7.14 a 7.23 muestran el resultado para cada una de las variables indicando el tamaño, la media, el valor máximo y mínimo y la desviación estándar separando a los individuos según la colección y el sexo al que pertenecen.

### 7.3.3. Selección de fórmulas de regresión

Basándonos en los estándares de Daubert y con la finalidad de realizar el estudio con aquellas fórmulas que tengan un porcentaje aceptable de clasificación correcta, se seleccionaron las fórmulas de regresión logística con resultados superiores al 75%. Dichas fórmulas se detallan en la tabla 7.24.

Tabla 7.13. Análisis descriptivo según colecciones.

|          |        | ANF     | CTS     | CTMS    | CTMI    | CTI     | CLI      | CLD      |
|----------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
| Órgiva   | Media  | 30,3245 | 32,2593 | 29,1700 | 27,0694 | 26,3666 | 107,6600 | 108,5145 |
|          | N      | 67      | 70      | 70      | 70      | 68      | 53       | 56       |
|          | DE     | 2,66513 | 3,83441 | 2,82924 | 2,66705 | 2,70753 | 8,26406  | 8,29882  |
|          | Mínimo | 24,73   | 25,77   | 23,66   | 21,84   | 21,91   | 92,68    | 93,05    |
|          | Máximo | 36,07   | 43,31   | 35,94   | 33,28   | 33,76   | 126,20   | 127,48   |
| San José | Media  | 30,3870 | 31,3215 | 29,1267 | 27,3766 | 26,6715 | 105,3763 | 106,5384 |
|          | N      | 166     | 169     | 169     | 170     | 170     | 147      | 146      |
|          | DE     | 3,40958 | 3,54638 | 2,96356 | 2,99829 | 5,41313 | 9,94750  | 9,69290  |
|          | Mínimo | 21,14   | 23,02   | 22,57   | 21,40   | 20,30   | 80,96    | 80,64    |
|          | Máximo | 41,05   | 42,58   | 38,48   | 38,55   | 88,76   | 131,74   | 134,98   |
| Grant    | Media  | 31,3858 | 32,3527 | 31,0535 | 28,9845 | 27,8549 | 107,9190 | 107,7222 |
|          | N      | 50      | 51      | 51      | 51      | 51      | 50       | 50       |
|          | DE     | 3,12023 | 3,96642 | 3,24634 | 2,88219 | 2,57775 | 10,35600 | 9,50593  |
|          | Mínimo | 24,39   | 24,31   | 24,95   | 22,64   | 21,68   | 74,79    | 82,27    |
|          | Máximo | 39,75   | 42,33   | 36,42   | 33,34   | 36,48   | 127,54   | 129,74   |

Tabla 7.13. Análisis descriptivo según colecciones. (continuación)

|          |        | LM       | ACLI    | ACLD    |
|----------|--------|----------|---------|---------|
| Órgiva   | Media  | 100,3871 | 59,0211 | 59,1208 |
|          | N      | 66       | 64      | 62      |
|          | DE     | 10,53094 | 5,44499 | 5,45720 |
|          | Mínimo | 78,33    | 47,78   | 44,49   |
|          | Máximo | 124,60   | 69,86   | 77,28   |
| San José | Media  | 100,7130 | 58,5543 | 58,7464 |
|          | N      | 164      | 165     | 162     |
|          | DE     | 11,24636 | 5,71572 | 5,77997 |
|          | Mínimo | 64,18    | 45,22   | 40,86   |
|          | Máximo | 128,61   | 75,92   | 73,72   |
| Grant    | Media  | 101,5755 | 61,8068 | 60,8347 |
|          | N      | 51       | 50      | 51      |
|          | DE     | 12,40181 | 6,31633 | 7,66053 |
|          | Mínimo | 67,33    | 48,62   | 28,56   |
|          | Máximo | 122,63   | 74,33   | 74,77   |

Tabla 7.14. Análisis descriptivo de la variable ANF según colecciones y sexo.

|          |        | N  | Media | Máximo | Mínimo | DE   |
|----------|--------|----|-------|--------|--------|------|
| Órgiva   | Hombre | 32 | 30,49 | 34,73  | 24,90  | 2,50 |
|          | Mujer  | 38 | 30,18 | 36,07  | 24,73  | 2,84 |
| San José | Hombre | 99 | 31,12 | 38,31  | 21,14  | 3,07 |
|          | Mujer  | 71 | 29,36 | 41,05  | 21,68  | 3,61 |
| Grant    | Hombre | 36 | 31,58 | 39,75  | 24,39  | 3,12 |
|          | Mujer  | 15 | 30,89 | 38,89  | 25,28  | 3,19 |

N: número de individuos; DE: desviación estándar

Tabla 7.15. Análisis descriptivo de la variable CTS según colecciones y sexo.

|          |        | N  | Media | Máximo | Mínimo | DE   |
|----------|--------|----|-------|--------|--------|------|
| Órgiva   | Hombre | 32 | 33,92 | 43,31  | 26,27  | 4,13 |
|          | Mujer  | 38 | 30,86 | 35,40  | 25,77  | 2,95 |
| San José | Hombre | 99 | 32,76 | 41,87  | 25,04  | 3,30 |
|          | Mujer  | 71 | 29,33 | 42,58  | 23,02  | 2,85 |
| Grant    | Hombre | 36 | 33,83 | 42,33  | 27,81  | 3,41 |
|          | Mujer  | 15 | 28,80 | 33,34  | 24,31  | 2,81 |

N: número de individuos; DE: desviación estándar

Tabla 7.16. Análisis descriptivo de la variable CTMS según colecciones y sexo.

|          |        | N  | Media | Máximo | Mínimo | DE   |
|----------|--------|----|-------|--------|--------|------|
| Órgiva   | Hombre | 32 | 30,45 | 35,94  | 23,66  | 3,05 |
|          | Mujer  | 38 | 28,09 | 31,58  | 23,86  | 2,13 |
| San José | Hombre | 99 | 30,37 | 38,48  | 22,88  | 2,70 |
|          | Mujer  | 71 | 27,37 | 33,56  | 22,57  | 2,39 |
| Grant    | Hombre | 36 | 32,20 | 36,42  | 25,38  | 2,76 |
|          | Mujer  | 15 | 28,29 | 33,65  | 24,95  | 2,65 |

N: número de individuos; DE: desviación estándar

Tabla 7.17. Análisis descriptivo de la variable CTMI según colecciones y sexo.

|          |        | Recuento | Media | Máximo | Mínimo | DE   |
|----------|--------|----------|-------|--------|--------|------|
| Órgiva   | Hombre | 32       | 28,36 | 33,28  | 21,84  | 2,91 |
|          | Mujer  | 38       | 25,98 | 30,34  | 22,10  | 1,87 |
| San José | Hombre | 99       | 28,49 | 35,99  | 22,89  | 2,63 |
|          | Mujer  | 71       | 25,83 | 38,55  | 21,40  | 2,79 |
| Grant    | Hombre | 36       | 29,96 | 33,34  | 22,78  | 2,45 |
|          | Mujer  | 15       | 26,64 | 31,78  | 22,64  | 2,50 |

N: número de individuos; DE: desviación estándar

Tabla 7.18. Análisis descriptivo de la variable CTI según colecciones y sexo.

|          |        | N  | Media | Máximo | Mínimo | DE   |
|----------|--------|----|-------|--------|--------|------|
| Órgiva   | Hombre | 32 | 27,56 | 33,76  | 22,04  | 2,81 |
|          | Mujer  | 38 | 25,37 | 30,02  | 21,91  | 2,20 |
| San José | Hombre | 99 | 27,89 | 88,76  | 21,08  | 6,63 |
|          | Mujer  | 71 | 24,97 | 29,23  | 20,30  | 2,06 |
| Grant    | Hombre | 36 | 28,50 | 36,48  | 24,02  | 2,49 |
|          | Mujer  | 15 | 26,31 | 29,75  | 21,68  | 2,15 |

N: número de individuos; DE: desviación estándar

Tabla 7.19. Análisis descriptivo de la variable CLI según colecciones y sexo.

|          |        | N  | Media  | Máximo | Mínimo | DE    |
|----------|--------|----|--------|--------|--------|-------|
| Órgiva   | Hombre | 32 | 111,04 | 123,87 | 94,26  | 8,12  |
|          | Mujer  | 38 | 105,07 | 126,20 | 92,68  | 7,51  |
| San José | Hombre | 99 | 108,81 | 131,74 | 83,61  | 9,16  |
|          | Mujer  | 71 | 100,10 | 128,04 | 80,96  | 8,79  |
| Grant    | Hombre | 36 | 110,10 | 127,54 | 89,62  | 8,69  |
|          | Mujer  | 15 | 102,31 | 117,61 | 74,79  | 12,41 |

N: número de individuos; DE: desviación estándar

Tabla 7.20. Análisis descriptivo de la variable CLD según colecciones y sexo.

|          |        | N  | Media  | Máximo | Mínimo | DE   |
|----------|--------|----|--------|--------|--------|------|
| Órgiva   | Hombre | 32 | 111,65 | 127,25 | 93,75  | 8,00 |
|          | Mujer  | 38 | 105,60 | 127,48 | 93,05  | 7,59 |
| San José | Hombre | 99 | 110,11 | 134,98 | 94,70  | 8,89 |
|          | Mujer  | 71 | 101,27 | 126,54 | 80,64  | 8,39 |
| Grant    | Hombre | 36 | 110,22 | 129,74 | 91,95  | 8,21 |
|          | Mujer  | 15 | 101,31 | 115,16 | 82,27  | 9,87 |

N: número de individuos; DE: desviación estándar

Tabla 7.21. Análisis descriptivo de la variable LM según colecciones y sexo.

|          |        | N  | Media  | Máximo | Mínimo | DE    |
|----------|--------|----|--------|--------|--------|-------|
| Órgiva   | Hombre | 32 | 103,37 | 124,60 | 79,06  | 11,04 |
|          | Mujer  | 38 | 97,90  | 119,19 | 78,33  | 9,54  |
| San José | Hombre | 99 | 104,10 | 128,61 | 76,14  | 9,95  |
|          | Mujer  | 71 | 96,05  | 121,49 | 64,18  | 11,33 |
| Grant    | Hombre | 36 | 102,31 | 122,63 | 67,93  | 11,77 |
|          | Mujer  | 15 | 99,81  | 116,91 | 67,33  | 14,07 |

N: número de individuos; DE: desviación estándar

Tabla 7.22. Análisis descriptivo de la variable ACLI según colecciones y sexo.

|          |        | N  | Media | Máximo | Mínimo | DE   |
|----------|--------|----|-------|--------|--------|------|
| Órgiva   | Hombre | 32 | 60,87 | 69,86  | 51,75  | 5,27 |
|          | Mujer  | 38 | 57,39 | 68,30  | 47,78  | 5,13 |
| San José | Hombre | 99 | 60,86 | 75,92  | 50,14  | 5,25 |
|          | Mujer  | 71 | 55,43 | 68,92  | 45,22  | 4,79 |
| Grant    | Hombre | 36 | 63,65 | 74,33  | 53,81  | 5,80 |
|          | Mujer  | 15 | 57,07 | 65,78  | 48,62  | 5,11 |

N: número de individuos; DE: desviación estándar

Tabla 7.23. Análisis descriptivo de la variable ACLD según colecciones y sexo.

|          |        | N  | Media | Máximo | Mínimo | DE   |
|----------|--------|----|-------|--------|--------|------|
| Órgiva   | Hombre | 32 | 61,05 | 77,28  | 52,26  | 5,57 |
|          | Mujer  | 38 | 57,31 | 67,42  | 44,49  | 4,75 |
| San José | Hombre | 99 | 61,00 | 73,72  | 49,92  | 5,41 |
|          | Mujer  | 71 | 55,63 | 66,59  | 40,86  | 4,76 |
| Grant    | Hombre | 36 | 62,20 | 74,77  | 28,56  | 8,13 |
|          | Mujer  | 15 | 57,56 | 65,99  | 47,30  | 5,31 |

N: número de individuos; DE: desviación estándar

Tabla 7.24. Fórmulas de regresión logística seleccionadas para el análisis de comparación de poblaciones y validación del método de Gaya-Sancho et al. (2018)

| <u>Ecuación</u>   | <u>Tasa de acierto</u> |
|---|------------------------|
| L11      14.352 - 0.477(CTS)                            | 77.26 %                |
| L12      22.011 - 0.395(CTS) - 0.097(CLD)               | 81.41 %                |
| L13      23.824 - 0.350(CTS) - 0.068(CLD) - 0.106(ACLD) | 80.66 %                |

### 7.3.4. Comparación de poblaciones

Antes de comenzar con el análisis se consideró la siguiente premisa de la especificidad de las fórmulas de regresión seleccionadas en este estudio al haber sido desarrolladas con una muestra de una población específica, lo que puede llevar a tasas de acierto menos precisas en el momento de aplicación dado el grado específico de dimorfismo sexual.

#### 7.3.4.1. Análisis de dimorfismo entre poblaciones

Bejdová, Dupej, Krajicez, Velemínska, Velemínský (2018), Bruzek, Kenyhercz, Klales, Stull, McCormick, Cole, Petaros, Garvi, Sholts, Schlaguer, Warmlander, Ubelaker y DeGaglia (2017) recomiendan que, para la validación de un método, o su aplicación, se tenga en cuenta la comparación de medias y se realice un análisis de dimorfismo sexual.

La tabla 7.25 ilustra los resultados obtenidos en el análisis de dimorfismo sexual realizado mediante la  $t$  de Student. Se separan los grupos por sexo y colección para cada una de las variables. El valor de significación para todos ellos demuestra las diferencias significativas entre sexos para todas las variables en las tres colecciones que conforman la muestra de este análisis.

Tabla 7.25. Dimorfismo sexual para cada una de las series.

|     |    | San José |         | Órgiva  |         | Grant   |         |
|-----|----|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
|     |    | Hombre   | Mujer   | Hombre  | Mujer   | Hombre  | Mujer   |
| CTS | N  | 98       | 71      | 32      | 38      | 36      | 15      |
|     | X  | 32.7646  | 29.3297 | 33.9188 | 30.8618 | 33.8342 | 28.7973 |
|     | DE | 3.30288  | 2.85099 | 4.13120 | 2.95500 | 3.41267 | 2.80794 |
|     | p  | 0.0000   |         | 0.0000  |         | 0.0000  |         |

N: número de individuos; X: media; DE: desviación estándar; p: significación

Tabla 7.25. Dimorfismo sexual para cada una de las series. (continuación)

|      |    |          |          |          |          |          |          |
|------|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| CLD  | N  | 87       | 59       | 27       | 29       | 36       | 14       |
|      | X  | 110.1117 | 101.2692 | 111.6474 | 105.5976 | 110.2175 | 101.3057 |
|      | DE | 8.88904  | 8.38592  | 8.00075  | 7.58713  | 8.21109  | 9.87403  |
|      | p  | 0.0000   |          | 0.0000   |          | 0.0000   |          |
| ACLD | N  | 94       | 68       | 30       | 32       | 36       | 15       |
|      | X  | 61.0034  | 55.6265  | 61.0530  | 57.3094  | 62.1981  | 57.5627  |
|      | DE | 5.40765  | 4.76050  | 5.56934  | 4.75236  | 8.12738  | 5.31026  |
|      | p  | 0.0000   |          | 0.0000   |          | 0.0000   |          |

N: número de muestra; x: media; SD: Desviación Estándar; p: significación

Posteriormente, se realizó un análisis de comparación de medias buscando diferencias entre las colecciones de estudio. La colección de San José fue la de referencia dado que fue con la que se desarrolló el método que se aplicó en las otras dos colecciones.

La tabla 7.26 muestra el resultado de la comparación de medias realizada entre las colecciones para cada variable analizada –e incluida en las fórmulas seleccionadas-. En la tabla se indica la media, la desviación estándar y el valor de significación tras un análisis de la t de Student.

A nivel general, las variables no muestran diferencias significativas entre las poblaciones. Sin embargo, la comparación entre el grupo de las mujeres entre la colección de San José y Órgiva muestra diferencias significativas en dos de las tres variables estudiadas ( $p \leq 0,05$ ).

Tabla 7.26. Comparación de medias

|        |          | CTS     |         |       | CLD      |         |       | ACLD    |         |       |
|--------|----------|---------|---------|-------|----------|---------|-------|---------|---------|-------|
|        |          | X       | DE      | p     | X        | DE      | p     | X       | DE      | p     |
| Hombre | San José | 32.7646 | 3.30288 |       | 110.1117 | 8.88904 |       | 61.0034 | 5.40765 |       |
|        | Órgiva   | 33.9188 | 4.13120 | 0,110 | 111.6474 | 8.00075 | 0,424 | 61.0530 | 5.56934 | 0,965 |
|        | Grant    | 33.8342 | 3.41267 | 0,102 | 110.2175 | 8.21109 | 0,951 | 62.1981 | 8.12738 | 0,333 |
| Mujer  | San José | 29.3297 | 2.85099 |       | 101.2692 | 8.38592 |       | 55.6265 | 4.76050 |       |
|        | Órgiva   | 30.8618 | 2.95500 | 0,010 | 105.5976 | 7.58713 | 0,021 | 57.3094 | 4.75236 | 0,102 |
|        | Grant    | 28.7973 | 2.80794 | 0,512 | 101.3057 | 9.87403 | 0,989 | 57.5627 | 5.31026 | 0,166 |

Tabla 7.26. Comparación de medias (continuación)

|       |          |         |         |       |          |         |       |         |         |       |
|-------|----------|---------|---------|-------|----------|---------|-------|---------|---------|-------|
| Total | San José | 31.3215 | 3.54638 |       | 106.5384 | 9.69290 |       | 58.7464 | 5.77997 |       |
|       | Órgiva   | 32.2593 | 3.83441 | 0,071 | 108.5145 | 8.29882 | 0,179 | 59.1208 | 5.45720 | 0,660 |
|       | Grant    | 32.3527 | 3.96642 | 0,078 | 107.7222 | 9.50593 | 0,455 | 60.8347 | 7.66053 | 0,039 |

---

X: media; DE: Desviación estándar; p: significación

### 7.3.4.2. Análisis del grado de dimorfismo sexual entre poblaciones

Tras esto y observando los resultados obtenidos, se realizó un análisis del grado dimorfismo sexual entre las colecciones. Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 9.27.

Tabla 7.27. Resultados del análisis de dimorfismo sexual según Relethford.

| Variable | Población | Dimorfismo | t       | df  | Sig. (p) |
|----------|-----------|------------|---------|-----|----------|
| CTS      | San José  | 111,7113   |         |     |          |
|          | Órgiva    | 109,9054   | 0,4067  | 235 | 0,0710   |
|          | Grant     | 117,4909   | -1,4753 | 216 | 0,0620   |
| CLD      | San José  | 108,7317   |         |     |          |
|          | Órgiva    | 105,7219   | 1,0449  | 198 | 0,1790   |
|          | Grant     | 108,7969   | -0,0223 | 192 | 0,4130   |
| ACLD     | San José  | 109,5323   |         |     |          |
|          | Órgiva    | 106,5323   | 1,0573  | 220 | 0,6600   |
|          | Grant     | 107,8841   | 0,4168  | 209 | 0,0330   |

t: valor de t de Relethford; df: grados de libertad; p: valor de significación

En el caso de la serie de Órgiva el grado de dimorfismo sexual es más bajo que en la población de San José –t de Relethford es igual o inferior a 1-. Sin embargo, el nivel de significación obtenido entre ambas colecciones implica que no hay diferencias significativas entre ellas.

En el caso de la serie de Grant, el grado de dimorfismo sexual es muy similar al de San José, siendo superior en algunas ocasiones. El nivel de significación obtenido en la comparación de ambas colecciones implica que no existen diferencias significativas entre ellas. De forma aislada aparecen diferencias significativas para ACLD, muy próximas al punto de corte de significación ( $p \leq 0,05$ ).

Manthey et al. (2017) comprobaron que los cambios entre euroamericanos y europeos eran visibles pese a sus ancestros comunes y que el estudio comparativo de poblaciones como éstas permitiría esclarecer y entender el dimorfismo sexual en población europea. En el presente trabajo se observa que no existen diferencias significativas pudiendo atribuir esta condición a su ancestría común.

Con base a los resultados, se pudo afirmar que no hay evidencias de que haya diferencias entre las poblaciones a nivel general, excepto si se comparan los resultados obtenidos para las mujeres entre las colecciones de San José y Órgiva.

Bejdová et al., (2018) indicó que las diferencias poblaciones pueden darse dentro de un mismo país al verse influenciada la población por factores socioeconómicos, de vida o relacionados con la asistencia médica (Jantz, 2004; Saini et al., 2011; Weisensee y Jantz, 2011; Wescott y Jantz, 2005).

Por otro lado, Alemán et al. (Alemán et al., 1999) realizaron una validación de sus funciones discriminantes entre dos series mediterráneas de distinto contexto geográfico y temporal dando un resultado positivo, pudiendo ser aplicadas las fórmulas desarrolladas con la primera serie –San José– en la segunda serie –Villanueva de Soportilla–.

#### 7.3.4.3. Aplicación de las fórmulas de regresión

La asunción principal que se consideró en el momento de la aplicación de las fórmulas de regresión seleccionadas fue la proximidad geográfica entre las series de San José y Órgiva y la similitud encontrada dentro de un contexto temporal entre todas las series.

Por otro lado, con los análisis realizados previamente, se comprobó que en términos generales las series no tenían diferencias significativas pudiéndose por ello aplicar las fórmulas de regresión desarrolladas por Gaya-Sancho et al., (2018).

Las tablas 7.28 y 7.29 muestran los porcentajes de asignación correcta resultantes de la aplicación de las fórmulas para las series de Órgiva y Grant respectivamente. Se añadió a las tablas el porcentaje de clasificación correcta que ofrecería el método original si se hubiera desarrollado con dichas series.

Tabla 7.28. Valores predictivos positivos para la serie de Órgiva.

|     |        | Hombre | Mujer | Valores predictivos positivos (%) | Valores predictivos positivos ofrecidos por el método original (%) |       |
|-----|--------|--------|-------|-----------------------------------|--|-------|
|     |        |        |       |                                   | Media  | DE    |
| L11 | Hombre | 27     | 21    | 56.25                             | 82.02  | 13.56 |
|     | Mujer  | 5      | 17    | 77.27                             | 70.61  | 13.61 |
| L12 | Hombre | 25     | 19    | 56.81                             | 83.43  | 14.42 |
|     | Mujer  | 2      | 10    | 83.33                             | 74.48  | 15.82 |
| L13 | Hombre | 25     | 17    | 59.52                             | 83.15  | 14.61 |
|     | Mujer  | 1      | 11    | 91.67                             | 74.84  | 15.92 |

DE: desviación estándar

Tabla 7.29. Valores predictivos positivos para la serie de Grant.

|     |        | Hombre | Mujer | Valores predictivos positivos (%) | Valores predictivos positivos ofrecidos por el método original (%) |       |
|-----|--------|--------|-------|-----------------------------------|--|-------|
|     |        |        |       |                                   | Media  | DE    |
| L11 | Hombre | 31     | 6     | 83.78                             | 81.45  | 13.91 |
|     | Mujer  | 5      | 9     | 64.29                             | 74.54  | 12.50 |
| L12 | Hombre | 32     | 4     | 88.89                             | 85.82  | 11.65 |
|     | Mujer  | 4      | 10    | 71.43                             | 77.45  | 15.20 |
| L13 | Hombre | 33     | 4     | 89.19                             | 85.8   | 13.07 |
|     | Mujer  | 4      | 9     | 69.23                             | 77.17  | 16.01 |

DE: desviación estándar

Según el método original, en la serie de Órgiva se esperaba, en general, una tasa de acierto superior al 82% para los hombres y al 70% en el caso de las mujeres. Sin embargo, los resultados muestran unos porcentajes de clasificación correcta bastante menores en los hombres estando entre el 56,25 y el 59,52%.

Esta disminución en el porcentaje de asignación correcta en los hombres se explica observando los resultados de las mujeres de la serie de Órgiva de la tabla 7.26. La presencia de diferencias significativas entre las medias de ambos grupos poblacionales y el valor de la media muestran que son más próximos al valor medio de la población masculina de la colección de San José. Por todo lo anterior, hay un gran número de mujeres de Órgiva que se clasifican como hombres perteneciendo en realidad al grupo de las mujeres.

En la serie de Grant, las tasas de acierto esperadas según el método original eran superiores al 80% para los hombres y al 74% para las mujeres. Sin embargo, los resultados empeoraban en el caso de las mujeres encontrando tasas de acierto entre el 64,29 y el 71,43%. Este fenómeno podría deberse al escaso número muestral del grupo femenino.

Estos resultados contrastan con lo esperado. Las colecciones de San José y Órgiva cuentan con un mismo contexto geográfico y temporal emitiendo por ello una hipótesis que consistía en que la aplicación de las fórmulas de regresión reportaría buenos porcentajes de clasificación correcta. Sin embargo, las colecciones de San José y Grant cuentan con el

mismo contexto temporal pero no geográfico y por ello los porcentajes serían más bajos a los esperados.

Muchos autores (Bruzek et al., 2017; Garvin & Klales, 2017; Gomez-Valdes et al., 2017; Kenyhercz et al., 2017; Oikonomopoulou et al., 2017; Petaros et al., 2017), en el momento de la validación de un método, se centran en recalibrar dicho método para, posteriormente, poder dar unas nuevas fórmulas que consistirían en unas ecuaciones modificadas en base a las originales, obteniendo así mejores resultados. Además, algunos autores afirman que la recalibración de los métodos/fórmulas puede llegar a ser realmente útil en el campo de la Antropología Forense y la Bioarqueología (Gomez-Valdés et al., 2017).

Sin embargo, Konigsberg, Herrmann, Wescott, Kimmerle (2008) y Liversidge (2010, 2015) sugieren que las diferencias observadas en los estudios de validación podrían estar siendo malinterpretadas como diferencias poblacionales, por lo que este énfasis por diseñar nuevos métodos, aparentemente más precisos y exactos, podría estar injustificado (Ubelaker, 2008).

En este apartado del presente trabajo se comprobaron que no existen diferencias entre muestras de poblaciones, pero no por ello podemos afirmar que no existan diferencias entre dichas poblaciones enteras ya que: validar un método no implica la existencia de diferencias poblacionales y, además, las muestras no son representativas de una población entera (Trotter, 2012).

Por este motivo consideramos de gran utilidad la realización de estudios comparativos que garanticen la homogeneidad de las muestras y creemos que los estudios que se realicen en el futuro dentro de esta línea han de estar orientados a ampliar las muestras de estudio, pudiendo incluso unificar los datos de todas esas muestras a pesar de su origen geográfico distinto, en vez de adaptar los métodos para que sean específicos de cada población. Con todo ello, se conseguiría que la aplicación de los métodos se pudiera realizar en el mayor número de casos posibles, aportando a su vez probabilidades de acierto más fiables.

Las fórmulas propuestas por Gaya-Sancho et al. (2018) han demostrado que el análisis métrico del sacro puede ser potencialmente un método aceptable para la estimación del sexo.

Por ahora, recomendamos su uso como método orientativo para la estimación del sexo cuando no se disponga de otras unidades anatómicas, como el cráneo o la pelvis, y aconsejamos que sea acompañado de otros métodos complementarios que involucren medidas de huesos largos, vértebras, etc.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

CONCLUSIONS



1. El análisis métrico del sacro proporcionó información cuantitativa acerca del dimorfismo sexual del mismo.
2. El error intraobservador e interobservador indicó alta reproducibilidad y fiabilidad en 12 de las 23 medidas establecidas en un comienzo.
3. El análisis descriptivo y la comparación de medias indicó un mayor valor en el grupo masculino frente al grupo femenino.
4. Se establecieron fórmulas de regresión logística consiguiendo un porcentaje aceptable (81,41%) de clasificación correcta.
5. Se comprobó que tanto la longitud como la anchura del sacro son dimensiones clave en el dimorfismo sexual.
6. El análisis multivariante arrojó mejores resultados que un análisis univariante de las medidas.
7. El rango de fiabilidad de las fórmulas se encuentra entre el 77,26 y el 81,41 % en el análisis multivariante.
8. Se ofrece un método complementario para la estimación del sexo en individuos adultos de población mediterránea.
9. El análisis del error interobservador e intraobservador indicó una elevada fiabilidad y reproducibilidad en la localización de *landmarks* y *semilandmarks* a lo largo de la curvatura sacra.

10. El método de deslizamiento de *semilandmarks* resultó efectivo para comprobar la curvatura sacra.
11. Los porcentajes de clasificación correcta mejoraron tras la inclusión de la variable de tamaño en el análisis.
12. Los porcentajes de asignación correcta oscilan entre 73,1 y 69,2% y de 76,9 a 75,4% tras la validación cruzada.
13. Sin embargo, los resultados no muestran dimorfismo sexual entre las formas, ni la forma y el tamaño en la curvatura sacra.
14. Los análisis de componentes principales y de variables canónicas sí que permiten establecer unas tendencias en la morfología de la curvatura sacra.
15. Los hombres contarían con una curva más abierta empezando a partir de la 3ª vértebra sacra; y las mujeres tenderían a una curva más cerrada con su ángulo en la 4ª vértebra sacra.
16. Las tendencias encontradas en el presente trabajo corresponderían con las establecidas previamente por los autores.
17. La comparación de las poblaciones de mismo contexto geográfico (San José y Órgiva) confirmaron a nivel general la inexistencia de diferencias significativas, salvo en el grupo de las mujeres.
18. La comparación de las poblaciones de diferente contexto geográfico (San José y Toronto) no mostraron diferencias significativas.

19. El grado de dimorfismo sexual corroboró la posibilidad de aplicación de las fórmulas de regresión al no encontrar diferencias significativas entre las muestras analizadas.

20. La aplicación de las fórmulas de regresión en ambas muestras poblacionales confirmó su usabilidad como complemento a otros métodos de estimación de sexo.

21. Las diferencias encontradas en el grupo femenino junto con las discrepancias en las tasas de clasificación correcta de las fórmulas dentro de Órgiva se atribuyen a un mayor tamaño de este grupo.



1. Metric analysis of sacrum provides quantitative information about its sexual dimorphism.
2. Intraobserver and Interobserver error indicated high reproducibility and reliability in 12 of the outset 23 measures
3. Descriptive analysis and mean comparison showed a greater value in the male group compared to the female group.
4. Logistic regression formulas were established, obtaining an acceptable percentage (81.41%) of correct classification.
5. It was found that both the length and width of the sacrum are key dimensions in sexual dimorphism.
6. Multivariate analysis provided better results than a univariate analysis of the measures.
7. The classification accuracy of the regression formulas ranges from 77.26 to 81.41% in the multivariate analysis.
8. A complementary method for the estimation of sex in adults of the Mediterranean population is presented.
9. Interobserver and Intraobserver error analyses indicated high reliability and reproducibility in the location of *landmarks* and *semilandmarks* along the sacral curvature.
10. *Semilandmarks* slide method was effective in capturing the sacral curvature.
11. The inclusion of the size variable in the analysis improved the correct assignments.

12. The classification accuracies range from 73.1 to 69.2% and from 76.9 to 75.4% after cross-validation.

13. However, the results do not show sexual dimorphism in form, nor form and size in the sacral curvature.

14. The analysis of principal components and canonical variables do allow us to establish tendencies in the morphology of the sacral curvature.

15. Men would have a more open curve starting from the 3rd sacral vertebra; and women tend to a more closed curve with their angle on the 4th sacral vertebra.

16. The trends found in the present work would correspond to those previously established by the authors.

17. Comparison of the same geographical context populations (San José and Órgiva) confirmed the absence of significant differences, except in the women's group.

18. Comparison of different geographical context populations (San Jose and Toronto) showed no significant differences.

19. The degree of sexual dimorphism allowed the application of the regression formulas due to the absence of significant differences between the analysed samples.

20. The application of regression formulas in both population samples confirmed their usability as a complement to other methods of estimating sex.

21. The larger size of the female group from Órgiva explains the differences and discrepancies in the correct classification rates of the regression formulas.

## CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA



- Acsádi, G., & Nemeskéri, J. (1970). History of Human Lifespan and Mortality. *Akadémai Kiadó, Budapest*.
- Adams, D. C., Rohlf, F. J., & Slice, D. E. (2004). Geometric morphometrics: Ten years of progress following the 'revolution'. *Ital. J. Zool.*, *71*, 5-16.
- Aguayo Canela, M. (2007). Cómo hacer una Regresión Logística con SPSS “paso a paso”. *Docuweb Fabis. Dot(0702012)*.
- Ahmed, A. A. (2013). Estimation of sex from the upper limb measurements of Sudanese adults. *J Forensic Leg Med*, *20(8)*, 1041-1047. doi:10.1016/j.jflm.2013.09.031
- Albanese, J. (2003). A metric method for sex determination using the hipbone and the femur *J Forensic Sci*, *48*, 263-273.
- Alemán, I., Botella, M., & Du Souich, P. (1999). Aplicación de las funciones discriminantes en la determinación del sexo. *Estudios de Antropología Biológica*, *IX*, 221-230.
- Alemán, I., Botella, M., & Ruiz, L. (1997). Determinación del sexo en el esqueleto postcranial. Estudio de una población mediterránea actual. *Archivo Español de Morfología.*, *2*, 7-17.
- Anastasiou, E., & Chamberlain, A. T. (2013). The Sexual Dimorphism of the Sacro-Iliac Joint: An Investigation Using Geometric Morphometric Techniques. *Journal of Forensic Sciences*, *58*, S126-S134. doi:10.1111/j.1556-4029.2012.02282.x
- Arnqvist, G., & Martensson, T. (1998). Measurement error in geometric morphometrics: empirical strategies to assess and reduce its impact on

measures of shape. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 44(1-2), 73-96.

- Arora, A., Gupta, P., Mahajan, S., & Kapoor, S. (2010). Significance of Sacral Index in estimation of sex in sacra os cadavers in Punjab. *J Indian Acad Forensic Med*, 32(2).
- Aykroyd, R., Lucy, D., Pollard, A., & Solheim, T. (1997). Regression analysis in adult age estimation. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 104(2), 259-265.
- Bailey, R. C., & Byrnes, J. (1990). A New, Old Method for Assessing Measurement Error in Both Univariate and Multivariate Morphometric Studies. *Systematic Biology*, 39(2), 124-130. doi:10.2307/2992450
- Bardeen, C. R. (1904). *Numerical vertebral variation in the human adult and embryo*: Nachdruck verboten.
- Bass, W. M. (1995). Human Osteology. A laboratory and field manual. *Columbia: Missouri Archaeological Society*.
- Bastir, M., Rosas, A., & O'Higgins, P. (2006). Craniofacial levels and the morphological maturation of the human skull. *J Anat*, 209(5), 637-654.
- Bejdova, S., Dupej, J., Krajicek, V., Veleminska, J., & Veleminsky, P. (2018). Stability of upper face sexual dimorphism in central European populations (Czech Republic) during the modern age. *Int J Legal Med*, 132(1), 321-330. doi:10.1007/s00414-017-1625-3
- Benazzi, S., Maestri, C., Parisini, S., Vecchi, F., & Gruppioni, G. (2009). Sex Assessment from the Sacral Base by Means of Image Processing. *Journal*

of *Forensic Sciences*, 54(2), 249-254. doi:10.1111/j.1556-4029.2008.00947.x

Bennett, K. A. (1981). On the expression of sex dimorphism. *Am J Phys Anthropol*, 56(1), 59-61.

Bennett, K. A. (1993). *A field guide for human skeletal identification*: Charles C Thomas Publisher.

Bisquerra Alzina, R. (1989). *Introducción conceptual al análisis multivariante. Un enfoque informático con los paquetes SPSS-X, BMPD, LISREL y SPAD*: PPU S.A. .

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. (1991). *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*: Cambridge University Press.

Bookstein, F. L. (1996). Combining the tools of geometric morphometrics *Advances in morphometrics* (pp. 131-151): Springer.

Bookstein, F. L. (1997a). Landmark methods for forms without landmarks: Localizing group differences in outline shape. *Med. Imagen Anal.*, 1(225-243).

Bookstein, F. L. (1997b). *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. . Cambridge: Cambridge University Press.

Bookstein, F. L., Gunz, P., Mitteroecker, P., Prossinger, H., Schaefer, K., & Seidler, H. (2003). Cranial integration in Homo: singular warps analysis of

the midsagittal plane in ontogeny and evolution. *Journal of human evolution*, 44(2), 167-187.

Bookstein, F. L., Streissguth, A. P., Sampson, P. D., Connor, P. D., & Barr, H. M. (2002). Corpus callosum shape and neuropsychological deficits in adult males with heavy fetal alcohol exposure. *Neuroimage*, 15(1), 233-251. doi:10.1006/nimg.2001.0977

Bruni, A. (1912). Über die Evolutiven und Involutiven Vorgänge der Choroa Dorsalis in der Wirbelsäule mit Besonderer Berücksichtigung der Amnioten. *Anatomische Hefte*, 45(2), 307-467.

Bruzeck, J. (2002). A methods for visual determination of sex, using the human hip bone. *Am. J. Phys. Anthropol.*, 117, 157-168.

Bruzek, J., Santos, F., Dutailly, B., Murail, P., & Cunha, E. (2017). Validation and reliability of the sex estimation of the human os coxae using freely available DSP2 software for bioarchaeology and forensic anthropology. *Am J Phys Anthropol*, 164(2), 440-449. doi:10.1002/ajpa.23282

Buikstra, J. E., & Ubelaker, D. H. (1994). Standards for data collection from human skeletal remains: proceedings of a seminar at the field museum of natural history, organized by Jonathan Hass. Arkansas Archeological Survey, Fayetteville.

Burns, K. R. (2015). *Forensic anthropology training manual*: Routledge.

Byers, S. (2005). *Introduction to Forensic Anthropology: A textbook* (2<sup>a</sup> ed.). California: Pearson/allyn and Bacon.

Bytheway, J. A., & Ross, A. H. (2010). A Geometric Morphometric Approach to Sex Determination of the Human Adult Os Coxa. *Journal of Forensic Sciences*, 55(4), 859-864. doi:10.1111/j.1556-4029.2010.01374.x

- Camacho-Sandoval, J. (2008). Coeficiente de concordancia para variables continuas. *Acta Médica Costarricense*, 50, 211-212.
- Cardoso, H. F., Gomes, J., Campanacho, V., & Marinho, L. (2013). Age estimation of immature human skeletal remains using the post-natal development of the occipital bone. *Int J Legal Med*, 127(5), 997-1004. doi:10.1007/s00414-013-0818-7
- Chandrakanth, H. V., Kanchan, T., & Krishan, K. (2014). Osteometric analysis for sexing of modern sternum - an autopsy study from South India. *Leg Med (Tokyo)*, 16(6), 350-356. doi:10.1016/j.legalmed.2014.07.007
- Christensen, A. M., & Crowder, C. M. (2009). Evidentiary standards for forensic anthropology. *J Forensic Sci*, 54(6), 1211-1216. doi:10.1111/j.1556-4029.2009.01176.x
- Cooke, S. B., & Terhune, C. E. (2015). Form, function, and geometric morphometrics. *The Anatomical Record*, 298(1), 5-28.
- Corp, I. B. M. (2012). IBM SPSS Statistics for Mac OSX (Version 21.0).
- Corporation, M. (2010). Microsoft Excel 2011 for Mac (Version 14.0.0).
- Cortés-Reyes, É., Rubio-Romero, J. A., & Gaitán-Duarte, H. (2010a). Métodos estadísticos de evaluación de la concordancia y la reproducibilidad de pruebas diagnósticas. *Revista Colombiana de Obstetricia y Ginecología*, 61(3), 247-255.
- Cortés-Reyes, É., Rubio-Romero, J. A., & Gaitán-Duarte, H. (2010b). Statistical methods for evaluating diagnostic test agreement and reproducibility. *Revista Colombiana de Obstetricia y Ginecología*, 61(3), 247-255.
- Courvoisier, D. S., Combescure, C., Agoritsas, T., Gayet-Ageron, A., & Perneger, T. V. (2011). Performance of logistic regression modeling: beyond the

number of events per variable, the role of data structure. *Journal of Clinical Epidemiology*, 64(9), 993-1000.  
doi:<http://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2010.11.012>

Cowal, L. S., & Pastor, R. F. (2008). Dimensional variation in the proximal ulna: evaluation of a metric method for sex assessment. *Am J Phys Anthropol*, 135(4), 469-478. doi:10.1002/ajpa.20771

Cunha, E., Baccino, E., Martrille, L., Ramsthaler, F., Prieto, J., Schuliar, Y., . . . Cattaneo, C. (2009). The problem of aging human remains and living individuals: a review. *Forensic Science International*, 193(1-3), 1-13.

Dabbs, G. (2010). Sex determination using the scapula in New Kingdom skeletons from Tell El-Amarna. *Homo*, 61(6), 413-420.  
doi:10.1016/j.jchb.2010.09.001

Dabbs, G. R., & Moore-Jansen, P. H. (2010). A method for estimating sex using metric analysis of the scapula. *J Forensic Sci*, 55(1), 149-152.  
doi:10.1111/j.1556-4029.2009.01232.x

Daubert v. Merrell Dow Pharmaceuticals. US Supreme Court 509. U.S. Patente No. 579,113S.Ct.2786, 125L (1963). *Ed.2d 469*.

Davies, C., Hackman, L., & Black, S. (2013). A test of the Whitaker scoring system for estimating age from the bones of the foot. *Int J Legal Med*, 127(2), 481-489.

Davivongs, V. (1963). PELVIC GIRDLE OF AUSTRALIAN ABORIGINE - SEX-DIFFERENCES AND SEX DETERMINATION. *Am J Phys Anthropol*, 21(4), 443-&. doi:10.1002/ajpa.1330210403

- De Luca, S., Navarro, F., & Cameriere, R. (2013). La prueba pericial y su valoración en el ámbito judicial español. *Revista Electrónica de Ciencia Penal y Criminología*(15-19), 19:11-19:14.
- Demirjian, A., Goldstein, H., & Tanner, J. (1973). A new system of dental age assessment. *Human biology*, 211-227.
- Díaz Quidiello, J. (2009). *Atlas de la historia del territorio de Andalucía*: Consejería de Vivienda y Ordenación del Territorio, Instituto de Cartografía ....
- Dibennardo, R., & Taylor, J. V. (1983). Multiple discriminant function analysis of sex and race in the postcranial skeleton. *Am J Phys Anthropol*, 61(3), 305-314. doi:10.1002/ajpa.1330610305
- Dirkmaat, D. C., & Cabo, L. L. (2012). Forensic anthropology: Embracing the new paradigm. In D. C. Dirkmaat (Ed.), *A companion to forensic anthropology* (pp. 3-40). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Dryden, I. L., & Mardia, K. V. (1993). Multivariate shape analysis. *Sankhyā: The Indian Journal of Statistics, Series A*, 460-480.
- Estevez Campo, E. J. (2018). *Estimación del sexo en individuos subadultos: aplicación de técnicas morfogeométricas en una población mediterránea*. (info:eu-repo/semantics/doctoralThesis), Universidad de Granada. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10481/52760>
- 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. *Int J Legal Med*, 131(6), 1747-1756. doi:10.1007/s00414-017-1659-6

- Fawcett, E. (1907). On the completion of ossification of the human sacrum. *Anat Anz*, 30, 414-421.
- Fawcett, E. (1938). The Sexing of the Human Sacrum. *J Anat*, 72(Pt 4), 633.
- Ferembach, D., Schwidetzky, I., & Stloukal, M. (1980). Recommendations for age and sex diagnoses of skeletons. *J. Hum. Evol.*, 9, 517-549.
- Ferrante, L., & Cameriere, R. (2009). Statistical methods to assess the reliability of measurements in the procedures for forensic age estimation. *Int J Legal Med*, 123(4), 277-283. doi:10.1007/s00414-009-0349-4
- Fischer, B., & Mitteroecker, P. (2017). Allometry and Sexual Dimorphism in the Human Pelvis. *Anatomical Record-Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology*, 300(4), 698-705. doi:10.1002/ar.23549
- Fisher, R. A. (1935). The logic of inductive inference. *Journal of the royal statistical society*, 98(1), 39-82.
- Flander, L. B. (1978). Univariate and multivariate methods for sexing the sacrum. *Am J Phys Anthropol*, 49(1), 103-110. doi:10.1002/ajpa.1330490116
- Fleiss, J. L. (2011). *Design and analysis of clinical experiments* (H. John Wiley & Sons Ed. Vol. 73).
- Fleiss, J. L., Levin, B., & Paik, M. C. (2013). *Statistical methods for rates and proportions*.
- Flores Sandí, G. (2004). Indicadores de calidad en la pericia forense. *Medicina Legal de Costa Rica*, 21, 119-128.
- Francisco, R. A., Evison, M. P., da Costa Junior, M. L., Pantozzi Silveira, T. C., Secchieri, J. M., & Guimaraes, M. A. (2017). Validation of a standard forensic anthropology examination protocol by measurement of applicability and reliability on exhumed and archive samples of known

biological attribution. *Forensic Science International*, 279, 241-250.  
doi:10.1016/j.forsciint.2017.08.015

Franklin, D., Cardini, A., Flavel, A., Kuliukas, A., Marks, M. K., Hart, R., . . . O'Higgins, P. (2012). Concordance of traditional osteometric and volume-rendered MSCT interlandmark cranial measurements. *Int. J. Leg. Med.*, 127, 1-16.

Franklin, D., Cardini, A., Flavel, A., & Marks, M. K. (2014). Morphometric analysis of pelvic sexual dimorphism in a contemporary Western Australian population. *Int J Legal Med*, 128(5), 861-872.  
doi:10.1007/s00414-014-0999-8

Freeman, V. (2010). "Toronto Has No History!": Indigeneity, Settler Colonialism, and Historical Memory in Canada's Largest City. *Urban History Review/Revue d'histoire urbaine*, 38(2), 21-35.

Fruciano, C. (2016). Measurement error in geometric morphometrics. *Development genes and evolution*, 226(3), 139-158.

Fruciano, C., Franchini, P., & Meyer, A. (2013). Resampling-based approaches to study variation in morphological modularity. *PLoS One*, 8(7), e69376.

Galdames, I. C. S., Matamala, D. A. Z., & Smith, R. L. (2008). Evaluating accuracy and precision in morphologic traits for sexual dimorphism in malnutrition human skull: a comparative study. *Int J Morphol*, 4, 877-881.

Gamba, T. D. O., Alves, M. C., & Haiter-Neto, F. (2016). Mandibular sexual dimorphism analysis in CBCT scans. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 38, 106-110. doi:10.1016/j.jflm.2015.11.024

Gapert, R., Black, S., & Last, J. (2009). Sex determination from the occipital condyle: discriminant function analysis in an eighteenth and nineteenth

- century British sample. *Am J Phys Anthropol*, 138(4), 384-394. doi:10.1002/ajpa.20946
- Garvin, H. M., & Klales, A. R. (2017). A Validation Study of the Langley et al. (2017) Decision Tree Model for Sex Estimation. *Journal of Forensic Sciences*. doi:10.1111/1556-4029.13688
- Gaya-Sancho, B., Aleman Aguilera, I., Navarro-Munoz, J. J., & Botella Lopez, M. (2018). Sex determination in a Spanish population based on sacrum. *J Forensic Leg Med*, 60, 45-49. doi:10.1016/j.jflm.2018.10.001
- Genovés, S. (1959). Diferencias sexuales en el Hueso Coxal. . *Universidad Autónoma de México, Mexico*.
- Giles, E., & Elliot, O. (1963). Sex determination by discriminant function analysis of crania. *Am J Phys Anthropol*, 21(1), 53-68.
- Gómez-Robles, A. (2010). *Análisis de la forma dental en la filogenia humana. Tendencias y modelos evolutivos basados en métodos de morfometría geométrica*. Ph. D. Dissertation, Universidad de Granada.
- Gomez-Valdes, J. A., Garmendia, A. M., Garcia-Barzola, L., Sanchez-Mejorada, G., Karam, C., Baraybar, J. P., & Klales, A. (2017). Recalibration of the Klales et al. (2012) method of sexing the human innominate for Mexican populations. *Am J Phys Anthropol*, 162(3), 600-604. doi:10.1002/ajpa.23157
- Gonzalez, P. N., Bernal, V., & Perez, S. I. (2009). Geometric morphometric approach to sex estimation of human pelvis. *Forensic Science International*, 189(1-3), 68-74. doi:10.1016/j.forsciint.2009.04.012
- Gonzalez, P. N., Bernal, V., Perez, S. I., & Barrientos, G. (2007). Analysis of dimorphic structures of the human pelvis: its implications for sex

- estimation in samples without reference collections. *Journal of Archaeological Science*, 34(10), 1720-1730. doi:10.1016/j.jas.2006.12.013
- Goodall, C. (1991). Procrustes Methods in the Statistical Analysis of Shape. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 53(2), 285-339.
- Goodall, C. R., & Mardia, K. V. (1993). Multivariate aspects of shape theory. *The Annals of Statistics*, 848-866.
- Gould, S. J. (1966). Allometry and size in ontogeny and phylogeny. *Biological Reviews*, 41(4), 587-638.
- Grabowski, M., & Roseman, C. C. (2015). Complex and changing patterns of natural selection explain the evolution of the human hip. *J. Hum. Evol.*, 85, 94-110.
- Grabowski, M. W. (2012). Hominin obstetrics and the evolution of constraints. *Evol. Biol.*, 40, 57-75.
- Gray, J. P., & Wolfe, L. D. (1980). Height and sexual dimorphism of stature among human societies. *Am J Phys Anthropol*, 53(3), 441-456.
- Green, W. D. K. (1996). The thin-plate spline and images with curving features. In K. V. Mardia, C. A. Gill, & I. L. Dryden (Eds.), *Proceedings in Image Fusion and Shape Variability Techniques* (pp. 79-87). Leeds: Leeds University Press.
- Gunz, P., & Mitteroecker, P. (2013). Semilandmarks: a method for quantifying curves and surfaces. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, 24(1), 103-109.
- Hamilton, M. E. (1982). Sexual dimorphism in skeletal samples. *Sexual dimorphism in Homo sapiens. New York: Praeger. p.*, 107-163.

- Harrell, F. E., Jr., Lee, K. L., & Mark, D. B. (1996). Multivariable prognostic models: issues in developing models, evaluating assumptions and adequacy, and measuring and reducing errors. *Stat Med*, *15*(4), 361-387. doi:10.1002/(sici)1097-0258(19960229)15:4<361::aid-sim168>3.0.co;2-4
- Harris, E. F. (2011). Dental age: The effects of estimating different events during mineralization. *Dental Anthropology*, *24*(2), 59-63.
- Harris, E. F., & Smith, R. N. (2009). Accounting for measurement error: a critical but often overlooked process. *Archives of oral biology*, *54*, S107-S117.
- Hefner, J. T. (2009). Cranial nonmetric variation and estimating ancestry. *J Forensic Sci*, *54*(985-995).
- Irurita, J. A., I. (2016). Proposal of new regression formulae for the estimation of age in infant skeletal remains from the metric study of the pars basilaris. *Int J Legal Med*, *131*(3).
- Irurita Olivares, J. (2014). *Estimación de la edad de individuos infantiles en antropología forense: resultados para la edad dental en una muestra de origen mediterráneo*. (info:eu-repo/semantics/doctoralThesis), Universidad de Granada. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10481/34021>
- Janipati, P. K., J.; Rao, V.S. (2014). Study of sacral index: Comparison between different regional populations of India and abroad. *Int J Anat Res*, *4*(4), 640-644.
- Jantz, L. M. (2004). *The meaning and consequences of morphological variation*. Paper presented at the The American Anthropological Association (AAA) (2003) Annual meeting on November 21, 2003, Illinois, Chicago.
- Kendall, D. G. (1977). The diffusion of shape. *Advances in Applied Probability*, *9*(3), 428-430.

- Kendall, D. G. (1981). The statistics of shape. *Interpreting multivariate data*, 75-80.
- Kendall, D. G. (1984). Shape manifolds, procrustean metrics, and complex projective spaces. *Bulletin of the London Mathematical Society*, 16(2), 81-121.
- Kenyhercz, M. W., Klales, A. R., Stull, K. E., McCormick, K. A., & Cole, S. J. (2017). Worldwide population variation in pelvic sexual dimorphism: A validation and recalibration of the Klales et al. method. *Forensic Science International*, 277, 8. doi:10.1016/j.forsciint.2017.05.001
- Kimura, K. (1982). A BASE-WING INDEX FOR SEXING THE SACRUM. *Journal of the Anthropological Society of Nippon*, 90, 153-162.
- Klales, A. R., Vollner, J. M., & Ousley, S. D. (2009). *A New Metric Procedure for the Estimation of Sex and Ancestry from de Human Innominate*. . Paper presented at the 61st Meeting of the American Academy of Forensic Science, Denver CO.
- Klingenberg, C. P. (1996). Multivariate allometry *Advances in morphometrics* (pp. 23-49): Springer.
- Klingenberg, C. P. (2008). Morpho J. Faculty of Life Sciences. University of Manchester, Manchester.
- Klingenberg, C. P. (2009). Morphometric integration and modularity in configurations of landmarks: tools for evaluating a priori hypotheses. *Evolution & development*, 11(4), 405-421.
- 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., & Hens, S. M. (1998). *Am J Phys Anthropol*, 107, 97-112.
- Konigsberg, L. W., Herrmann, N. P., Wescott, D. J., & Kimmerle, E. H. (2008). Estimation and Evidence in forensic Anthropology: Age-at-Death. *J Forensic Sci*, 53(3), 541-557.
- Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *Journal of chiropractic medicine*, 15(2), 155-163.
- Kothapalli, J. V., SD.; Desai, V.; Zameer, MR. (2012). Morphometric study of sexual dimorphism in adult sacra of South Indian population. *Int J Biol Med Res*, 3(3), 2076-2081.
- Krogman, W. M., & Iscan, M. Y. (1986). The Human Skeleton in Forensic Medicine. *Charles C. Thomas, Springfield, IL*.
- Latour, J., Abaira, V., Cabello, J. B., & Sánchez, J. L. (1997). Las mediciones clínicas en cardiología: validez y errores de medición. *Revista española de cardiología*, 50(2), 117-128.
- Lavelle, M. (1995). NATURAL-SELECTION AND DEVELOPMENTAL SEXUAL VARIATION IN THE HUMAN PELVIS. *Am J Phys Anthropol*, 98(1), 59-72. doi:10.1002/ajpa.1330980106
- Lele, S. R., & Richtsmeier, J. T. (2001). *An invariant approach to statistical analysis of shapes*: Chapman and Hall/CRC.
- Leutenegger, W., & Cheverud, J. (1982). Correlates of sexual dimorphism in primates: ecological and size variables. *International Journal of Primatology*, 3(4), 387.
- Lewis, C. J., & Garvin, H. M. (2016). Reliability of the Walker cranial nonmetric method and implications for sex estimation. *J Forensic Sci*, 61, 743-751.

- Lin, L. (1989). A Concordance Correlation Coefficient to Evaluate Reproducibility. *Biometrics*, 45(1), 255-268. doi:10.2307/2532051
- Lin, L. (2000). *Correction: a note on the concordance correlation coefficient* (Vol. 56).
- Linck, A. (1911). Ueber die Genese der Bursa pharyngea embryonalis. *Ztschr. f. Ohrenh.*, 62, 158.
- Liversidge, H. (2010). Interpreting group differences using Demirjian's dental maturity method. *Forensic Science International*, 201(1-3), 95-101.
- Liversidge, H. M. (2008). *Dental age revisited*.
- Liversidge, H. M. (2010). Interpreting group differences using Demirjian's dental maturity method. *Forensic Sci Int*, 201, 95-101.
- Liversidge, H. M. (2015). Controversies in age estimation from developing teeth. *Ann Hum Biol*, *Early Online*, 1-10. doi:10.3109/03014460.2015.1044468
- Lockwood, C. A., Lynch, J. M., & Kimbel, W. H. (2002). Quantifying temporal bone morphology of great apes and humans: an approach using geometric morphometrics. *J Anat*, 201(6), 447-464.
- López Lázaro, S. (2016). *Análisis de morfometría geométrica en dentición humana. Estimación del sexo en población mediterránea*. (info:eu-repo/semantics/doctoralThesis), Universidad de Granada. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10481/40618>
- López-Guadalupe, J. J. (2006). El cementerio municipal de San José. Memoria de Granada (pp. 19-37). López-Guadalupe JJ, editor. Memoria de Granada. Estudios en torno al cementerio. : Granada: Emucea.
- Loth, S., & Iscan, M. (Eds.). (2000). *Sex determination*. . San Diego: Academic Press.

- Madrigal, L. (1998). *Statistics for anthropology*: Cambridge University Press.
- Mall, F. (1899). A contribution to the study of the pathology of early human embryos; 3 pts. *Baltimore, 1908*, 1-68.
- Manthey, L., Jantz, R. L., Bohnert, M., & Jellinghaus, K. (2017). Secular change of sexually dimorphic cranial variables in Euro-Americans and Germans. *Int J Legal Med*, *131*(4), 1113-1118. doi:10.1007/s00414-016-1469-2
- Mardia, K., & Dryden, I. (1994). Shape averages and their bias. *Advances in Applied Probability*, *26*(2), 334-340.
- Mardia, K. V., & Goodall, C. R. (1993). Spatial-temporal analysis of multivariate environmental monitoring data. *Multivariate environmental statistics*, *6*(76), 347-385.
- Martín Andrés, A., & Luna del Castillo, J. d. D. (1989). Bioestadística para las ciencias de la salud. 2ª Ed. Norma. Madrid. .
- Marugán Lobón, J. (2007). Disparidad e integración en el cráneo de Archosauria: aplicaciones de la Morfología Teórica y la Morfometría Geométrica en Macroevolución= Disparity an integration of the skull in Archosauria: Applications of Theoretical Morphology & Geometric Morphometrics in Macroeolution.
- Mastrangelo, P., De Luca, S., Aleman, I., & Botella, M. C. (2011). Sex assessment from the carpals bones: discriminant function analysis in a 20th century Spanish sample. *Forensic Sci Int*, *206*(1-3), 216.e211-210. doi:10.1016/j.forsciint.2011.01.007
- Mastrangelo, P., De Luca, S., & Sanchez-Mejorada, G. (2011). Sex assessment from carpals bones: discriminant function analysis in a contemporary

Mexican sample. *Forensic Sci Int*, 209(1-3), 196.e191-115.  
doi:10.1016/j.forsciint.2011.04.019

McBride, G. (2005). A proposal for strength-of-agreement criteria for Lin's Concordance Correlation Coefficient. In N. C. Report (Ed.). Hamilton, New Zealand: National Institute of Water & Atmospheric Research.

Mishra, S., Singh, P., Agrawal, A., & Gupta, R. (2003). Identification of sex of sacrum of Agra region. *J Anat Sco. India*, 52(2), 132-136.

Mitteroecker, P., & Gunz, P. (2009). Advances in geometric morphometrics. *Evolutionary Biology*, 36(2), 235-247.

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.

Moore-Jansen, P. H., & Plochocki, J. H. (1999). Morphometric variation and sex determination in the human sacrum. *Am J Phys Anthropol*, 205-206.

Novotny, V. (1988). *The pinciple of equifinality and the evolution of sexual dimorphism of the human pelvis*. Paper presented at the 12th International Congress of Antrhpological and Ethnological Sciences, Zagreb.

Oettlé, A. C., Pretorius, E., & Steyn, M. (2009). Geometric morphometric analysis of the use of mandibular gonial eversion in sex determination. *Homo*, 60, 29-43.

Ogawa, Y., Imaizumi, K., Miyasaka, S., & Yoshino, M. (2013). Discriminant functions for sex estimation of modern Japanese skulls. *J Forensic Leg Med*, 20(4), 234-238. doi:10.1016/j.jflm.2012.09.023

Oikonomopoulou, E. K., Valakos, E., & Nikita, E. (2017). Population-specificity of sexual dimorphism in cranial and pelvic traits: evaluation of existing and

- proposal of new functions for sex assessment in a Greek assemblage. *Int J Legal Med*, 131(6), 1731-1738. doi:10.1007/s00414-017-1655-x
- Olze, A., Reisinger, W., Geserick, G., & Schmeling, A. (2006). Age estimation of unaccompanied minors: Part II. Dental aspects. *Forensic Science International*, 159, S65-S67.
- Ortega Calvo, M., & Cayuela Domínguez, A. (2002). Regresión logística no condicionada y tamaño de muestra: una revisión bibliográfica. *Revista Española de Salud Pública*, 76, 85-93.
- Ostrofsky, K. R., & Churchill, S. E. (2015). Sex determination by discriminant function analysis of lumbar vertebrae. *J Forensic Sci*, 60(1), 21-28. doi:10.1111/1556-4029.12543
- Passalacqua, N. V., Vollner, J. M., & Rainwater, C. W. (2010). Geometric morphometric analysis of the human sacrum and its utility in sex estimation. *Am J Phys Anthropol*, 185-186.
- Paterson, A. (1893). Anomalies in the Skeleton of a Negro. *J Anat Physiol*, 27, 22-24.
- Paterson, A. M. (1893). The human sacrum. *Scient.Trans.R.*, 5.
- Patriquin, M., Steyn, M., & Loth, S. R. (2002). Metric assessment of race from the pelvis in South Americans. *Forensic Science International*, 127, 104-113.
- Patriquin, M. L., Loth, S. R., & Steyn, M. (2003). Sexually dimorphic pelvic morphology in South African whites and blacks. *Homo-Journal of Comparative Human Biology*, 53(3), 255-262. doi:10.1078/0018-442x-00049

- Patriquin, M. L., Steyn, M., & Loth, S. R. (2005). Metric analysis of sex differences in South African black and white pelves. *Forensic Sci Int*, 147, 119-127.
- Peduzzi, P., Concato, J., Kemper, E., Holford, T. R., & Feinstein, A. R. (1996). A simulation study of the number of events per variable in logistic regression analysis. *Journal of Clinical Epidemiology*, 49(12), 1373-1379. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0895-4356\(96\)00236-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0895-4356(96)00236-3)
- Perez, S. I., Bernal, V., & Gonzalez, P. N. (2006). Differences between sliding semi-landmark methods in geometric morphometrics, with an application to human craniofacial and dental variation. *J Anat*, 208(6), 769-784.
- Petaros, A., Garvi, H. M., Sholts, S. B., Schlager, S., & Warmlander, S. (2017). Sexual dimorphism and regional variation in human frontal bone inclination measured via digital 3D models. *Legal Medicine*, 29, 53-61. doi:10.1016/j.legalmed.2017.10.001
- Phenice, T. W. (1969). A newly developed visual method of sexing the os pubis. *Am J Phys Anthropol*, 30(2), 297-301. doi:10.1002/ajpa.1330300214
- Pita Fernández, S., Pértega Díaz, S., & Rodríguez Maseda, E. (2003). La fiabilidad de las mediciones clínicas: el análisis de concordancia para variables numéricas. *Cad Aten Primaria*, 10(4), 290-296.
- Plochocki, J. H. (2011). Sexual Dimorphism of Anterior Sacral Curvature. *Journal of Forensic Sciences*, 56(1), 161-164. doi:10.1111/j.1556-4029.2010.01455.x
- Pohar, M. B., M.; Turk, S. (2004). Comparison of logistic regression and linear discriminant analysis: a simulation study. *Metodoloski zvezki*, 1(1), 143.
- Poirier, P., & Charpy, A. (1899). *Traité d'anatomie humaine*. Lahure, Paris.

- Posth, M. (1897). *Le sacrum. Th<sup>e</sup> se de Paris*.
- Press, S. W., S. (1978). Choosing between logistic regression and discriminant analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 73(364), 699-705.
- Prieto, L., Lamarca, R., & Casado, A. (1998). Assessment of the reliability of clinical findings: the intraclass correlation coefficient. *Medicina clinica*, 110(4), 142-145.
- Rabinovich, S. (1995). *Measurement errors. Theory and practice. New York: American Institute of Physics, c1995*.
- Ramsthaller, F., Kettner, M., Gehl, A., & Verhoff, M. A. (2010). Digital forensic osteology: morphological sexing of skeletal remains using volumen-rendered cranial CT scans. *Forensic Sci Int*, 195, 148-152.
- Ravichandran, D., Shanthi, K. C., Shankar, K., & Chandra, H. (2013). A study on sacral index in Tamil Nadu and andhra pradesh population of southern India. *J Clin Diagn Res*, 7(9), 1833-1834. doi:10.7860/jcdr/2013/6494.3326
- Relethford, J. H., & Hodges, D. C. (1985). A statistical test for differences in sexual dimorphism between populations. *Am J Phys Anthropol*, 66(1), 55-61. doi:10.1002/ajpa.1330660105
- Richtsmeier, J. T., Burke Deleon, V., & Lele, S. R. (2002). The promise of geometric morphometrics. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 119(S35), 63-91.

- Risech, C., & Malgosa, A. (1991). Importancia relativa de la longitud del pubis y la anchura del ilion en el estudio del dimorfismo sexual de los coxales. *Bol. Soc. Esp. Antop. Biol.*, 12(29-43).
- Risech, C., & Malgosa, A. (1997). Sex prediction by discriminant function with central portion measures of innominate bones. *Homo*, 48(22-32).
- Rogers, T., & Saunders, S. (1994). Accuracy of sex determination using morphological traits of the human pelvis. *J Forensic Sci*, 39, 261-281.
- Rohlf, F. J. (1998). On applications of geometric morphometrics to studies of ontogeny and phylogeny. *Systematic Biology*, 47(1), 147-158.
- Rohlf, F. J. (2005). tpsDig, digitize landmarks and outlines, version 2.05. Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook, New York.
- Rohlf, F. J. (2007). tpsRelw version 1.45. Department of Ecology and Evolution. state University of New York, Stony Brook.
- Rohlf, F. J. (2009). tpsUtil version 1.44. New York State University at Stony Brook.
- Rohlf, F. J. (2010). tpsRelw, relative warps analysis, version 1.49. *Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook*.
- Rohlf, F. J., Loy, A., & Corti, M. (1996). Morphometric analysis of Old World Talpidae (Mammalia, Insectivora) using partial-warp scores. *Systematic Biology*, 45(3), 344-362.
- Rohlf, F. J., & Marcus, L. F. (1993). A revolution morphometrics. *Trends in ecology & evolution*, 8(4), 129-132.
- Rohlf, F. J., & Slice, D. (1990). Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks. *Systematic Biology*, 39(1), 40-59.

- Rosenberg, K., & Trevathan, W. (1996). Bipedalism and human birth: the obstetrical dilemma revisited. *Evol Anthropol Issues News Rev*, 4, 161-168.
- Rösing, F. W., Graw, M., Marré, B., Ritz-Timme, S., Rothschild, M. A., Röttscher, K., . . . Geserick, G. (2007). Recommendations for the forensic diagnosis of sex and age from skeletons. *Homo-Journal of Comparative Human Biology*, 58(1), 75-89.
- Rusk, K., & Ousley, S. D. (2011). Sex estimation using anterior sacral curvature: a geometric morphometric approach. *Am J Phys Anthropol*, 144, 259-259.
- Rusk, K. M., & Ousley, S. D. (2016). An evaluation of sex- and ancestry-specific variation in sacral size and shape using geometric morphometrics. *Am J Phys Anthropol*, 159(4), 646-654. doi:10.1002/ajpa.22926
- Saguar Quer, C. (2006). La casa de los muertos. El cementerio en la España del siglo XIX. In L.-G. JJ (Ed.), *Memoria de Granada. Estudios en torno al cementerio* (pp. 279-323). Granada: Emuceca.
- Saini, V., Srivastava, R., Shamal, S. N., Singh, T. B., Pandey, A. K., & Tripathi, S. K. (2011). Sex determination using mandibular ramus flexure: a preliminary study on Indian population. *J Forensic Legal Med*, 18, 208-212.
- Saldías, E., Malgosa, A., Jordana, X., & Isidro, A. (2016). Sex estimation from the navicular bone in Spanish contemporary skeletal collections. *Forensic Science International*, 267, 229.e221-229.e226. doi:10.1016/j.forsciint.2016.08.002
- Sampson, P. D., Bookstein, F. L., Sheehan, F. H., & Bolson, E. L. (1996). Eigenshape analysis of left ventricular outlines from contrast ventriculograms *Advances in morphometrics* (pp. 211-233): Springer.

- Sanabria Medina, C., Catalina Polo, L., & Botella, M. C. (2011). Dimorfismo sexual en primera vértebra cervical en una muestra de población colombiana. *Revista Española de Medicina Legal*, 37(4), 140-145. doi:10.1016/S0377-4732(11)70080-3
- Schultze, O. (1896). Ueber embryonale und bleibende Segmentierung. *Verh. Anat. Ges.*
- Sheets, H. D. (2003). IMP-integrated morphometrics package. Department of Physics, Canisius College, Buffalo, NY.
- Sheets, H. D., Covino, K. M., Panasiewicz, J. M., & Morris, S. R. (2006). Comparison of geometric morphometric outline methods in the discrimination of age-related differences in feather shape. *Frontiers in zoology*, 3(1), 15.
- Sheets, H. D., Kim, K., & Mitchell, C. E. (2004). A combined landmark and outline-based approach to ontogenetic shape change in the Ordovician trilobite *Triarthrus becki* *Morphometrics* (pp. 67-82): Springer.
- Shrout, P. E., & Fleiss, J. L. (1979). Intraclass correlations: uses in assessing rater reliability. *Psychological bulletin*, 86(2), 420.
- Singleton, M. (2002). Patterns of cranial shape variation in the Papionini (Primates: Cercopithecinae). *Journal of human evolution*, 42(5), 547-578.
- Slice, D. E. (2005). Modern morphometrics *Modern morphometrics in physical anthropology* (pp. 1-45): Springer.
- Slice, D. E. (2007). Geometric morphometrics. *Annu. Rev. Anthropol.*, 36, 261-281.
- Smith, B. H. (1991). Standards of human tooth formation and dental age assessment: Wiley-Liss Inc.

- Solomon, L. (2007). *Toronto sprawls: a history*: University of Toronto Press.
- Srivastava, R., Saini, V., Rai, R. K., Pandey, S., & Tripathi, S. K. (2012). A study of sexual dimorphism in the femur among North Indians. *J Forensic Sci*, 57(1), 19-23. doi:10.1111/j.1556-4029.2011.01885.x
- St. Hoyme, L. E., & Iscan, M. Y. (1989). Determination of sex and race: Accuracy and assumptions. In M. Iscan & K. A. R. Kennedy (Eds.), *Reconstruction of Life From the Skeleton* (pp. 53-93). New York: Alan R. Liss.
- Stewart, T. D., & Kerley, E. R. (1979). *Essentials of forensic anthropology: especially as developed in the United States*: Charles C. Thomas Springfield, IL.
- Steyn, M., & İşcan, M. (2008). Metric sex determination from the pelvis in modern Greeks. *Forensic Science International*, 179(1), 86. e81-86. e86.
- Steyn, M., & Patriquin, M. (2009). Osteometric sex determination from the pelvis—does population specificity matter? *Forensic Science International*, 191(1), 113. e111-113. e115.
- Sthoyme, L. E. (1982). SEX-DIFFERENCES IN THE POSTERIOR PELVIS. *Am J Phys Anthropol*, 57(2), 222-223.
- Tague, R. G. (2007). Costal process of the first sacral vertebra: Sexual dimorphism and obstetrical adaptation. *Am J Phys Anthropol*, 132(3), 395-405. doi:10.1002/ajpa.20531
- Tawald, V., & Makandar, U. (2013). Comparative metrical study of sacrum in North Indian and South Indian population. *Indian Journal of Forensic Medicine & Toxicology*, 7(1), 204-208.
- Tefnin, R. (2000). Reflexiones sobre la imagen egipcia antigua: La medida y el juego. *Arte y sociedad del Egipto antiguo*, 15-36.

- Thompson, D. W. (1942). On growth and form. *Cambridge: Cambridge University Press*.
- Torimitsu, S., Makino, Y., Saitoh, H., Sakuma, A., Ishii, N., Yajima, D., . . . Iwase, H. (2017). Sex determination based on sacral and coccygeal measurements using multidetector computed tomography in a contemporary Japanese population. *Journal of Forensic Radiology and Imaging*, 9(Supplement C), 8-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jofri.2017.01.001>
- 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.
- Trotter II, R. T. (2012). Qualitative research sample design and sample size: Resolving and unresolved issues and inferential imperatives. *Preventive Medicine*, 55, 398-400.
- Trotter, M. (1926). The sacrum and sex. *American Journal of Physical Anthropology*, 9, 445-450.
- Trotter, M., & Gleser, G. C. (1952). Estimation of stature from long bones of American Whites and Negroes. *Am J Phys Anthropol*, 10(4), 463-514.
- Ubelaker, D. H. (2008). Issues in the Global Applications of Methodology in Forensic Anthropology. *J Forensic Sci*, 53(3), 606-607.
- Ubelaker, D. H., & DeGaglia, C. M. (2017). Population variation in skeletal sexual dimorphism. *Forensic Science International*, 278, 7. doi:10.1016/j.forsciint.2017.06.012

- Van Gerven, D. P., & Oakland, G. B. (1973). Univariate and multivariate statistical model in the analysis of human sexual dimorphism. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 22(4), 256-268.
- Vazquez, C. (2015). La admisibilidad de las pruebas periciales y la racionalidad de las decisiones judiciales. *Cuaderno de Filosofía del Derecho*, 38, 101-130.
- Verhoff, M. A., Marcel, A., Ramsthaler, F., Krähhahn, J., Deml, U., Gille, R. J., . . . Kreutz, F. (2008). Digital forensic osteology-possibilities in cooperation with the Virtopsy (r) project. *Forensic Sci Int*, 174, 152-156.
- Viciano Badal, J. (2013). *Métodos odontométricos para la estimación del sexo en individuos adultos y subadultos*. (info:eu-repo/semantics/doctoralThesis), Universidad de Granada. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10481/23983>
- Viciano, J., Lopez-Lazaro, S., & Aleman, I. (2013). Sex estimation based on deciduous and permanent dentition in a contemporary Spanish population. *Am J Phys Anthropol*, 152(1), 31-43. doi:10.1002/ajpa.22324
- Vittinghoff, E., & McCulloch, C. E. (2007). Relaxing the rule of ten events per variable in logistic and Cox regression. *Am J Epidemiol*, 165(6), 710-718. doi:10.1093/aje/kwk052
- Vollner, J. M., Passalacqua, N. V., & Rainwater, C. W. (2011). *New Linear Measurements for the Estimation of Sex from the Human Sacrum*. Paper presented at the 63rd Meeting of the American Academy of Forensic Science, Chicago, IL.
- Vollner, J. M., Passalacqua, N. V., & Rusk, K. (2011). A re-evaluation of the power of "standard" measurements in estimating sex and sex-specific ancestry from the innominate and sacrum. *Am J Phys Anthropol*, 144, 301-301.

- von Cramon-Taubadel, N., Frazier, B. C., & Lahr, M. M. (2007). The problem of assessing landmark error in geometric morphometrics: theory, methods, and modifications. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 134(1), 24-35.
- Walker, P. L. (2005). Greater sciatic notch morphology: sex, age, and population differences. *Am. J. Phys. Anthropol.*, 127, 385-391.
- Walker, P. L. (2008). Sexing skulls using discriminant function analysis of visually assessed traits. *Am J Phys Anthropol*, 136, 39-50.
- Walrath, D. E., Turner, P., & Bruzeck, J. (2004). Reliability test of the visual assessment of cranial traits for sex determination. *Am. J. Phys. Anthropol.*, 125, 132-137.
- Webster, M., & Sheets, H. D. (2010). A practical introduction to landmark-based geometric morphometrics. *Quant Methods Paleobiol*, 16, 168-188.
- Weisensee, K. E., & Jantz, R. L. (2011). Secular changes in craniofacial morphology of the Portuguese using geometric morphometrics. *Am J Phys Anthropol*, 145, 548-559.
- Wescott, D. J. (2000). Sex variation in the second cervical vertebra. *J Forensic Sci*, 45(2), 462-466.
- Wescott, D. J., & Jantz, R. L. (2005). Assessing craniofacil secular change in American blacks and whites using geometric morphometry. In D. E. Slice (Ed.), *Modern morphometrics in physical anthropology* (pp. 231-245). New York: Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers.
- Wilder, H. H. (1920). *A Laboratory Manual of Anthropometry* (P. Blakiston's Sons ed.). Philadelphia.

- Williams, B. A., & Rogers, T. L. (2006). Evaluating the accuracy and precision of cranial morphological traits for sex determination. *J Forensic Sci*, 51, 729-735.
- Williams, L. W. (1908). THE LATEII DEVELOPMENT OF THE NOTOCHORD IN MAMMALS. Bt. *The American Journal of Anatomy*, 8, 251.
- Wolpoff, M. H., Aguirre, E., Becker, M. J., Hajn, V., Kennedy, K. A., Murad, T. A., . . . Smith, F. H. (1976). Some aspects of the evolution of early hominid sexual dimorphism [and Comments and Reply]. *Current Anthropology*, 17(4), 579-606.
- Zelditch, M. L., Lundrigan, B. L., & Garland Jr, T. (2004). Developmental regulation of skull morphology. I. Ontogenetic dynamics of variance. *Evolution & development*, 6(3), 194-206.
- Zelditch, M. L., Swiderski, D. L., & Sheets, H. D. (2012). *Geometric morphometrics for biologist: a primer*. Cambridge: Academic Press.