



Tese de Doutoramento

**CRÁNEOS PERUANOS CON
DEFORMACIÓN INTENCIONADA:
UN ESTUDIO MORFOMÉTRICO
A PARTIR DE
TELE-RADIOGRAFÍA LATERAL**

Isabel Ferros Santos

Departamento de Estomatología
RD 778/1998

FACULTAD DE MEDICINA Y ODONTOLOGÍA
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

SANTIAGO DE COMPOSTELA
2015







*Ilustración de portada:
Cráneo Paracas
(deformación circunferencial).*

*Ilustración de contraportada:
imágenes de fardos Ancon
en: Reiss W. y Stübel A. (1880-1887). *The Necropolis of Ancon in Peru.*
A contribution to our knowledge of the culture and industries of the Empire of the Incas.
*Third volume. A. Asher & Co. Berlin.**



TESIS DOCTORAL

**CRÁNEOS PERUANOS CON
DEFORMACIÓN INTENCIONADA:
UN ESTUDIO MORFOMÉTRICO
A PARTIR DE TELE-RADIOGRAFÍA
LATERAL**

Isabel Maria Ferros de Azevedo Oliveira dos Santos

DEPARTAMENTO DE ESTOMATOLOGÍA
FACULTADE DE MEDICINA Y ODONTOLOGÍA

R.D.778/1998

SANTIAGO DE COMPOSTELA

2015



Prof. Dra. Dna. María Jesús Mora Bermúdez,

Profesora Titular do Departamento de Estomatología, Facultad de Medicina y Odontología de Universidad de Santiago de Compostela.

Prof. Dr. D. Arturo Martínez Insua,

Profesor Titular do Departamento de Estomatología, Facultad de Medicina y Odontología de Universidad de Santiago de Compostela.

Como Directores da Tese de Doutoramento titulada

“ CRÁNEOS PERUANOS CON DEFORMACIÓN INTENCIONADA:
UN ESTUDIO MORFOMÉTRICO A PARTIR DE TELE-RADIOGRAFÍA LATERAL”

Presentada por **Dna. Isabel Maria Ferros de Azevedo Oliveira dos Santos**

Alumno do Programa de Doutoramento R.D.778/1998

Autoriza a presentación da tese indicada, considerando que reúne os requisitos esixidos no artigo 34 do regulamento de Estudos de Doutoramento, e que como Director da mesma non incurre nas causas de abstención establecidas na lei 30/1992.

Santiago de Compostela, 4 Noviembre 2015

Prof. Dra. Dna. María Jesús Mora Bermúdez,

Prof. Dr. D. Arturo Martínez Insua,



AGRADECIMIENTOS

Esta tesis doctoral no se habría podido realizar sin la orientación, el vasto conocimiento, la motivación y la ayuda especialmente del Profesor Arturo Martínez Insua; junto a la Profesora María Jesús Mora y al Profesor Urbano Santana, quiero agradecerles la confianza y convicción de que yo terminaría esta etapa y la paciencia que han tenido conmigo para concluir este trabajo.

Me gustaría también agradecer al Dr. Publio Jiménez Mendoza la ayuda en la obtención de los datos de este estudio. Éste no hubiera sido posible sin todas las puertas que me ha abierto en su magnífico país, incluyendo las de su familia que me ha brindado una estancia inolvidable.

Agradezco también a la familia del Prof. Arturo Martínez su paciencia e incentivo y el tiempo que me han cedido de su convivencia familiar.

A Patricia Maita, Flor Bovadin y a Lizbeth Briceño, equipo de Antropología Física del Museo Nacional de Arqueología, Antropología e Historia del Perú, y a la Dra. Hilda Vidal; con ellos viví buenos momentos de trabajo y de descanso durante mi estancia en Perú y tuve su completa disponibilidad a lo largo de los años para solucionar los obstáculos que parecen perseguir a todo investigador. Gracias también a Carlos Murga, por su paciencia y ayuda en la localización de los cráneos investigados, a los distintos equipos de dirección y a los trabajadores de los departamentos del museo incluyendo carpintería, fotografía y otros; gracias especiales al Dr. Rubén Carretero y su familia por la ayuda en la obtención de las radiografías así como por su recibimiento excepcional en Lima.

Me gustaría agradecer también a Óscar Gómez por su apoyo en el maquetado de la tesis; a mis auxiliares, en especial a Ana María, porque resistieron y me ayudaron durante estos años; al Dr. Philip Bazire, un traductor sin igual y a Idoia Obeso por su ayuda con los artículos.

Un agradecimiento a mi familia por su apoyo y ayuda incondicional en todos mis proyectos.

Por último, de modo intemporal, a los precursores andinos cuyos restos han resultado, una vez más, útiles para la Ciencia.

MUCHAS GRACIAS A TODOS.



ÍNDICE





ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	XVII
SUMMARY	XIX
RESUMO	XXI
ÍNDICE DE FIGURAS	XXIII
ÍNDICE DE TABLAS	XXVI
ACRÓNIMOS	XXIX

1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA Y GEOGRÁFICA 1

1.1 ÉPOCA.....	3
1.2 RUTAS.....	4
1.3 ORIGEN.....	6
1.4 AMÉRICA DEL SUR.....	7
1.5 CULTURAS PERUANAS.....	9
1.5.1 PERIODO ARCAICO.....	10
1.5.2 PERIODO FORMATIVO.....	11
1.5.2.1 TEMPRANO Y MEDIO.....	11
1.5.2.2 TARDÍO.....	12
1.5.3 PERIODO INTERMEDIO TEMPRANO.....	12
1.5.4 HORIZONTE MEDIO.....	13
1.5.5 PERIODO INTERMEDIO TARDÍO.....	13
1.5.6 HORIZONTE TARDIO.....	14

2. DEFORMACIÓN CRANEAL. Revisión histórica y tipología... 19

2.1 REVISIÓN HISTÓRICA.....	21
2.2 TIPOLOGÍA DE LAS DEFORMACIONES Y ELEMENTOS DEFORMADORES.....	27
2.3 CULTURAS COSTEÑAS CON DEFORMACIÓN ANTERO-POSTERIOR.....	28

2.4 CULTURAS ANDINAS Y COSTEÑAS CON DEFORMACIÓN CIRCULAR O ANULAR.....	34
3. APUNTE GEOGRÁFICO-CULTURAL SOBRE LOS CRÁNEOS EMPLEADOS	41
3.1 PARACAS	43
3.2 ANCON.....	48
3.3 MAKAT-TAMPU.....	50
4. MORFOMETRÍA	53
4.1 INTRODUCCIÓN MORFOMETRÍA	55
4.2 OBTENCIÓN DE LOS DATOS.....	58
4.3 LOS <i>LANDMARKS</i>	59
4.3.1 HOMOLOGÍA.....	59
4.3.2 CONSISTENCIA EN LA POSICIÓN RELATIVA.....	60
4.3.3 COBERTURA ADECUADA DE LA FORMA.....	60
4.3.4 REPETIBILIDAD	60
4.3.5 COPLANARIDAD	60
4.3.6 TIPOS DE <i>LANDMARKS</i>	61
4.4 ERROR DE MEDIDA.....	63
4.5 LA PERSISTENCIA DEL TAMAÑO DENTRO DEL ANÁLISIS	64
4.6 ANÁLISIS DE COORDENADAS.....	64
4.7 ANÁLISIS DE PLACA DELGADA (<i>THIN PLATE-SPLINE</i> - TPS).....	70
4.8 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA).....	71
4.9 OTROS ANALISIS ESTADISTICOS.....	73
4.10 ANÁLISIS DE FUNCIÓN DISCRIMINANTE (DFA)	74
4.11 ANÁLISIS DE VARIANTES CANÓNICAS (CVA)	75
4.12 ANÁLISIS DE MÍNIMOS CUADRADOS PARCIALES (PLS).....	76
5. INTEGRACIÓN Y MODULARIDAD	81
5.1 INTRODUCCIÓN	83
5.2 CRANEO Y MODULARIDAD	88
6. CRECIMIENTO CRANEAL.....	93
6.1 INTRODUCCIÓN	95
6.2 CRECIMIENTO CRANEOFACIAL.....	96
6.3 PROCESO DE OSIFICACIÓN.....	100
6.4 TEORÍAS DE DESARROLLO CRANEOFACIAL	104
7. CRANEOMETRÍA DE CRÁNEOS DEFORMADOS Y ALTERACIONES MAXILARES	113

8. OBJETIVO E HIPÓTESIS	131
8.1 MANDÍBULA	133
8.2 MAXILAR	133
9. MATERIAL Y MÉTODOS	137
9.1 MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA	141
9.2 CEFALOMETRÍA CLÁSICA MULTIVARIABLE (CCM)	146
9.3 MÉTODOS ESTADÍSTICOS	148
10. RESULTADOS	155
10.1 MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA	157
10.1.1 MANDÍBULA	157
10.1.2 MAXILAR	164
10.2 CEFALOMETRÍA CLÁSICA MULTIVARIABLE	169
11. DISCUSIÓN	181
11.1 MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA	183
11.1.1 BASE Y MANDÍBULA	183
11.1.2 CLIVUS Y MANDÍBULA	184
11.1.3 MANDÍBULA	185
11.1.4 INTEGRACIÓN MANDÍBULA	186
11.1.5 BASE Y MAXILA	187
11.1.6 CAMBIOS EN EL COMPLEJO NASOMAXILAR	188
11.1.7 INTEGRACIÓN MAXILA	190
11.2 CEFALOMETRÍA CLÁSICA MULTIVARIABLE	191
11.3 LIMITACIONES	192
12. CONCLUSIONES	197
12.1 MANDÍBULA Y BASE	199
12.2 MAXILA Y BASE	199
12.3 CEFALOMETRÍA CLÁSICA MULTIVARIABLE	199
13. BIBLIOGRAFÍA	203
14. ÍNDICE ONOMÁSTICO	235
15. APÉNDICE I	243
16. APÉNDICE II	251
17. APÉNDICE III	257



RESUMEN

El desarrollo craneofacial es un proceso muy complejo en el que se produce una interacción jerarquizada entre diferentes unidades morfológicas. Estas estructuras presentan cierta independencia, pero a su vez una estrecha interdependencia tanto en su función como en su desarrollo. Es bastante aceptada la íntima relación entre el desarrollo de la base craneal y el crecimiento del complejo nasomaxilar, más polémico es el hecho en lo que concierne a la relación entre el prognatismo mandibular y los cambios en la base craneal, es decir que una posición más anterior de la fosa glenoidea conlleva una posición más protrusiva de la mandíbula. Los cráneos con modificación morfológica artificial por deformación de la bóveda de origen cultural, son una fuente de información muy relevante sobre estas interacciones entre la bóveda craneal, la base craneal y el viscerocráneo. Son, a pesar de su aparente heterogeneidad, una muestra que permite el estudio de la interacción entre los patrones de crecimiento normales y la deformación permanente.

El objetivo de este trabajo fue investigar las relaciones morfológicas entre estas tres unidades anatómicas en cráneos sujetos a dos tipos de deformación intencional (ADC).

Se procedió para ello a la realización de un estudio a partir de radiografías laterales de cráneo y cara. El estudio morfológico fue llevado a cabo con morfometría geométrica y con cefalometría clásica multivariada. Para ello se configuró una muestra de tres grupos de cráneos: 32 con deformación antero-posterior de la bóveda craneal (AP), 17 con deformación circunferencial de la bóveda (C) y 39 sin deformación aparente. Todos ellos cráneos amerindios anteriores al contacto con los europeos, provenientes de la región de la costa andina en el Perú.

Se constató que la base craneal se ve marcadamente afectada por la deformación de la bóveda. También se produce una alteración en las estructuras del viscerocráneo. El complejo nasomaxilar muestra a consecuencia de la modificación del desarrollo (en los AP), alteraciones del techo de la órbita como consecuencia de la rotación de la fosa craneal anterior y desplazamiento nasal anterior. En ambos tipos de deformación (AP y C) se observa prognatismo a expensas del proceso alveolar, y, en los sujetos con deformación circunferencial hay rotación de la maxila y desplazamiento de la órbita. En la deformación AP se produce ante-rotación de las estructuras de la zona malar. Se confirma el plano facial posterior como una estructura axial que sirve de interfase entre la base craneal media y el complejo nasomaxilar.

La mandíbula también se ve afectada por la deformación craneal: se produce el estrechamiento y elongación de la rama mandibular, rotación del cuerpo de la mandíbula y un aumento de la altura anterior mandibular, todo ello en consonancia con un proceso de compensación dentoalveolar. El desplazamiento mandibular hacia delante no se produce en el grado en el que se observa un desplazamiento anterior de la fosa craneal media. Los efectos específicos causados por la deformación craneal intencional en la mandíbula apoyan la hipótesis de que el prognatismo mandibular es de causa multifactorial y, aunque la mandíbula mantiene una estrecha integración con la base craneal hay otros muchos factores que pueden neutralizar el efecto directo del desplazamiento anterior de la base craneal.

El estudio realizado con cefalometría clásica multivariable, permite ratificar los cambios morfológicos, modificaciones estructurales (angulares) de carácter general, pero no permite estudiar el comportamiento detallado de determinadas estructuras frente a cada tipo de deformación.

PALABRAS CLAVE

Morfometría geométrica, deformación craneal artificial, cefalometria.



SUMMARY

Craniofacial development is a highly complex process that involves a hierarchical interaction between different morphological units. Although these structures exhibit a degree of independence, they do have close functional and developmental interdependence. The intimate relationship between the development of the cranial base and the growth of the nasomaxillary complex is widely accepted; more controversial, however, is the possible relationship between mandibular prognathism and changes to the cranial base, with a more protrusive position of the mandible when the glenoid fossa is in a more anterior position. Skulls with artificial morphological modification, produced by deformation of the vault for cultural reasons, are a source of very relevant information about the interactions between the cranial vault, the cranial base and the viscerocranium. Despite their apparent heterogeneity, these skulls form a sample that permits us to study the interaction between normal growth patterns and permanent deformation.

The objective of this study was to investigate the morphological relationship between these three anatomical units (cranial base, mandible and nasomaxillary complex) in skulls subjected to two different methods of intentional deformation (ADC).

Lateral x-rays of the skull and face were used to perform a morphological study using geometric morphometry and classical multivariate cephalometry. The skulls were divided into three groups: 32 with antero-posterior (AP) cranial vault deformation, 17 with circumferential vault deformation (C) and 39 with no apparent deformity. The skulls were of Amerindian origin from the Andean coastal region of Peru, from a period prior to contact with Europeans.

Deformation of the vault was found to have a marked effect on the cranial base. Alterations were also observed in the structures of the viscerocranium, with changes in the nasomaxillary complex resulting from the modification of development (in the AP skulls), and alterations of the roof of the orbit secondary to rotation of the anterior cranial fossa, with anterior nasal displacement. Prognathism observed was observed in both types of deformation (AP and C), at the expense of the alveolar process. Skulls with circumferential deformation showed rotation of the maxilla and displacement of the orbit. AP deformation was associated with ante-rotation of the structures of the malar region. The posterior facial plane was shown to be an axial structure that serves as an interface between the middle cranial base and the nasomaxillary complex.

The mandible is also affected by cranial deformation: narrowing and elongation of the mandibular ramus were detected, with rotation of the body of mandible and an increased mandibular anterior height, all of which were associated with a dento-alveolar compensation process. The degree of anterior mandibular displacement did not mirror the anterior displacement of the middle cranial fossa. The specific effects of intentional cranial deformation on the mandible support the hypothesis that mandibular prognathism is of multifactorial origin and, although the mandible is closely integrated with the cranial base, there are many other factors that can neutralize the direct effect of the anterior displacement of the cranial base.

The classical multivariate cephalometry study confirmed the morphological changes and structural (angular) changes of a general nature, but did not permit a detailed study of the behaviour of certain structures in each type of deformation.

KEY WORDS

Geometric morphometrics, artificial cranial deformation, cephalometry.



RESUMO

O desenvolvimento craniofacial é um processo muito complexo no qual se produz uma interacção hierárquica entre diferentes unidades morfológicas. Estas estruturas apresentam certa independência, mas ao mesmo tempo uma estreita interdependência tanto na sua função como desenvolvimento. É bastante aceite a íntima relação entre o desenvolvimento da base craneal e o crescimento do complexo naso-maxilar. Mais polémico é o facto que diz respeito à relação entre o prognatismo mandibular e as mudanças na base craneal, ou seja uma posição mais anterior da fossa glenóide leva a uma posição mais protrusiva da mandíbula. Os crânios com modificação morfológica artificial por deformação da abóbada de origem cultural, são uma fonte de informação muito relevante sobre as interações entre a abóbada craneal, a base craneal e o viscerocranium. São, apesar da sua aparente heterogeneidade, uma amostra que permite o estudo da interacção entre os padrões de crescimento normais e a deformação permanente.

O objetivo deste trabalho foi investigar as relações morfológicas entre estas três unidades anatómicas em crânios sujeitos a dois tipos de deformação intencional (ADC).

Procedeu-se para isso à realização de um estudo a partir de radiografias laterais da face e crânio. O estudo morfológico foi levado a cabo com morfometria geométrica e cefalometria clássica multivariável. Para isso realizou-se uma amostra de três grupos de crânios: 32 com deformação antero-posterior da abóbada craneal (AP), 17 com deformação circunferencial da abóbada (C) e 39 sem deformação aparente. Todos eles crânios ameríndios, anteriores ao contacto com os europeus, provenientes da região costeira andina do Perú.

Constatou-se que a base craneal é marcadamente afectada pela deformação da abóbada e que também se produz uma alteração nas estruturas do viscerocraneo. O complexo naso-maxilar mostra a consequência da modificação do desenvolvimento (nos AP), alterações do teto da órbita como consequência da rotação da fossa craneal anterior e deslocação nasal anterior. Em ambos os tipos de deformação (AP e C) observa-se prognatismo a expensas do processo alveolar e, nos sujeitos com deformação circunferencial, há rotação da maxila e deslocação da órbita. Na deformação AP há uma rotação anterior das estruturas da zona malar. Confirma-se o plano facial posterior como uma estrutura axial que serve de interfase entre a base craneal média e o complexo naso-maxilar.

A mandíbula também é afectada pela deformação craneal: produz-se o estreitamento e alongamento da rama mandibular, rotação do corpo da mandíbula e um aumento da altura anterior mandibular, tudo isto em consonância com um processo de compensação dento-alveolar. O deslocamento mandibular para a frente não se produz no grau em que se observa um deslocamento anterior da fossa craneal média. Os efeitos específicos causados pela deformação craneal intencional na mandíbula apoiam a hipótese de que o prognatismo mandibular é de causa multifactorial e ainda que a mandíbula mantenha uma estreita integração com a base craneal há

muitos outros factores que podem neutralizar o efeito directo do deslocamento anterior da base craneal.

O estudo realizado com cefalometria clássica multivariada permite confirmar as mudanças morfológicas, modificações estruturais (angulares) de carácter geral, mas não permite estudar o comportamento detalhado de determinadas estruturas em relação a cada tipo de deformação.

PALAVRAS CHAVE

Morfometría geométrica, deformação cranial artificial, cefalometria.



ÍNDICE DE FIGURAS

1. Breve Reseña Histórica y Geográfica.

1.1 Mapa Paleoambiental de Beríngea.....	3
1.2 Rutas migratorias.....	5
1.3 Haplogrupos, DNA mitocondrial.....	7
1.4 Cronología del antiguo Perú.....	10
1.5 Cerámica Moche.....	12

2. Deformación craneal. Revisión histórica y tipología.

2.1 Descripción morfología craneal de Vesalio.....	22
2.2 Mapa de tipologías de deformación.....	31
2.3 Cuña deformadora.....	32
2.4 Aparato deformador para compresión antero-posterior y ceramio.....	33
2.5 Aparato deformador circunferencial (Paracas).....	34
2.6 Deformaciones extremas. Tipo Huara.....	37

3. Apunte geográfico-cultural sobre los cráneos empleados.

3.1 Mapa del Perú.....	43
3.2 Manto Paracas.....	44
3.3 Cronograma de culturas peruanas.....	46
3.4 Plano de las Necrópolis de Ancon.....	48
3.5 Sección de las tumbas en Ancon.....	49
3.6 Dendograma de relaciones craneométricas.....	50

4. Morfometría.

4.1 Clasificación <i>landmarks</i>	62
4.2 Representación análisis Procrustes.....	66
4.3 Espacio forma de Kendall.....	67
4.4 <i>Wireframe</i> mandíbula y base craneal.....	69
4.5 Albrecht Dürer. Estudio proporciones faciales.....	69
4.6 <i>Thin-plate Spline</i> (TPS). Representación de <i>wireframes</i> con y sin deformación.....	70
4.7 Análisis de Componentes Principales. Etapas.....	72
4.8 Componentes principales. Representación gráfica.....	72
4.9 <i>Eigenvalues</i> de los componentes principales.....	72
4.10 Análisis de Variantes Canónicas. Etapas.....	74
4.11 Incrementos en la magnificación.....	77

5. Integración y modularidad.	
5.1 Definición de módulos.....	83
5.2 Hipótesis de Matriz Funcional.....	89
6. Crecimiento craneal.	
6.1 Cronograma del cierre de suturas y fontanelas.....	97
6.2 Sección coronal a través de las meninges.....	98
6.3 Niveles craneofaciales de desarrollo del cráneo.....	99
6.4 Vista superior de la base craneal humana.....	102
6.5 Representación esquemática de las contrapartes de Enlow.....	107
7. Craneometría de cráneos deformados y alteraciones maxilares.	
7.1 Esquema entorno epigenético de Waddington, 1962.....	115
7.2 Litografía de cráneo Ancon.....	117
9. Material y métodos.	
9.1 Fotos de los dos tipos de cráneos deformados utilizados en el presente estudio.....	139
9.2 Representación de los aparatos utilizados en la deformación craneal intencional presente en este estudio.....	140
9.3 Deformación circunferencial. Representación <i>Wireframe</i> base craneal, mandíbula y complejo nasomaxilar en una telerradiografía lateral del cráneo.....	141
9.4 Deformación circunferencial. Representación del <i>Wireframe</i> base craneal y complejo nasomaxilar en una telerradiografía lateral del cráneo.....	143
9.5 Líneas de referencia utilizadas en el estudio de la base craneal.....	146
9.6 Líneas de referencia utilizadas en el estudio de la posición de los maxilares.....	146
9.7 Líneas de referencia utilizadas en la cuantificación del desarrollo vertical facial.....	147
9.8 Líneas de referencia utilizadas en el estudio de la disposición del plano mandibular.....	147
10. Resultados.	
10.1 Autovalores (<i>eigenvalues</i>) de los PCs de base craneal y mandíbula.....	157
10.2 TPS y dispersión de PC1 y PC2 en base craneal y mandíbula.....	157
10.3 TPS y dispersión de PC1 y PC3 en base craneal y mandíbula.....	158
10.4 TPS y dispersión de PC2 y PC4 en base craneal y mandíbula.....	159
10.5 TPS y dispersión de CV1 y CV2 en base craneal y mandíbula.....	160
10.6 DFA de medias de diferencias morfológicas: control y deformados C.....	161
10.7 DFA de medias de diferencias morfológicas: control y deformados AP.....	161
10.8 DFA de medias de diferencias morfológicas: deformados C y deformados AP.....	161
10.9 Dispersión y representación TPS del PLS entre base craneal y mandíbula.....	162

10.10 Autovalores (<i>eigenvalues</i>) de los PCs de base craneal y complejo nasomaxilar.	164
10.11 TPS y dispersión de PC1 y PC2 en base craneal y complejo nasomaxilar.....	165
10.12 TPS y dispersión de PC3 y PC4 en base craneal y complejo nasomaxilar.	166
10.13 TPS y dispersión de CV1 y CV2 en base craneal y complejo nasomaxilar.	167
10.14 DFA de medias de diferencias morfológicas: deformación AP y C. Base craneal y complejo nasomaxilar.....	168
10.15 DFA de medias de diferencias morfológicas: deformación C y grupo control. Base craneal y complejo nasomaxilar.	168
10.16 DFA de medias de diferencias morfológicas: deformación AP y grupo control. Base craneal y complejo nasomaxilar.	169
10.17 Gráfico de sedimentación - saturación PCs.....	170
10.18 Gráfico de nube de puntos y centroides PC1-PC2.....	172
10.19 Gráfico de nube de puntos y centroides PC1-PC3.....	173
10.20 Gráfico de nube de puntos y centroides PC2-PC3.....	174
15. Apéndice I.	
15.1 Gráfico de componentes PCs.....	247





ÍNDICE DE TABLAS

1. Breve Reseña Histórica y Geográfica.	
2. Deformación craneal. Revisión histórica y tipología.	
2.1 Tipos de deformación según Weiss, 1962.....	29
3. Apunte geográfico-cultural sobre los cráneos empleados.	
4. Morfometria.	
5. Integración y modularidad.	
6. Crecimiento craneal.	
7. Craneometría de cráneos deformados y alteraciones maxilares.	
8. Objetivo e Hipótesis.	
9. Material y métodos.	
9.1 Definición <i>landmarks</i> . Mandíbula.....	142
9.2 Definición <i>landmarks</i> . Maxilar superior.....	144
9.3 Definición <i>landmarks</i> . Cefalometría Clásica multivariable.....	145
9.4 Estadísticos de fiabilidad. Coeficiente de correlación intraclase.....	149
9.5 Matriz de correlaciones.....	150
9.6 Anova de un factor.....	151
10. Resultados.	
10.1 CVA y distancias Procrustes.....	160
10.2 Patrones de integración base craneal-maxilares.....	162
10.3 GLM análisis univariante de valores PLS entre bloques.....	163
10.4 Distancias Procrustes entre grupos.....	167
10.5 Varianza total explicada (saturación de la varianza).....	170
10.6 Matriz de componentes.....	171
10.7 Matriz de estructura.....	171
10.8 Matriz de correlaciones de componentes.....	172
10.9 PC1-variables descripción.....	175
10.10 Pruebas post hoc-comparaciones múltiples. Scheffé.....	176/7
10.11 PC2 - variables descripción.....	177
10.12 PC3 - variables descripción.....	178

15. Apéndice I.

15.1 Anova de un factor descriptivos.....	245/6
15.2 KMO y prueba de Bartlett.....	246
15.3 Anova de comparación de scores de PCs.....	247



ACRÓNIMOS

a.C.	Antes de Cristo.
d.C.	Después de Cristo.
B.P.	<i>Before present</i> (antes del presente).
HM	Horizonte medio.
PIT	Periodo intermedio temprano.
MNAAH	Museo Nacional de Arqueología, Antropología e Historia del Perú.
U/ND	Grupo control.
AP	Deformación antero-posterior.
C	Deformación circunferencial.
ADC	Cráneos deformados artificialmente.
FMH	Hipótesis de matriz funcional.
NMC	Complejo nasomaxilar.
CCM	Cefalometría clásica multivariable.
ACF	Fosa craneal anterior.
MCF	Fosa craneal media.
PCF	Fosa craneal posterior.
SES	Sincondrosis esfeno-etmoidal
SOS	Sincondrosis esfeno-occipital

CEFALOMETRÍA

Na	Nasion - Punto más anterior de la sutura fronto-nasal. Línea media.
S	Sella - Centro de la silla turcica (fosa pituitaria). Línea media.
Ba	Basion - Punto más inferior y ventral en la margen anterior del <i>foramen magnum</i> . Línea media.
Bo	Punto de Bolton - Punto más alto de la curvatura entre el condylus occipitalis y el borde inferior del hueso occipital. Línea media.
Fca	Fosa craneal anterior - Línea que pasa por el foramen coecum y termina a nivel de la base de la apófisis clinoides anterior. Línea media.
ENA	Espina nasal anterior - Punto más anterior de la apófisis nasal, en el suelo de la cavidad nasal. Línea media.
ENP	Espina nasal posterior - Punto más posterior del paladar duro. Línea media.
Pr	Prosthion - Punto más oclusal de la cresta alveolar bucal. Línea media.
A	Subespinal - Punto más profundo en la concavidad entre la ENA y el Prosthion. Línea media.
B	Punto B supramental - Punto más posterior del contorno externo de la sínfisis. Línea media.
Pm	Protuberancia menti - Punto ubicado en el contorno anterior del mentón, en donde la sínfisis de la mandíbula pasa de cóncava a convexa. Línea media.
Pog	Pogonion - Punto más prominente en la parte anterior de la sínfisis mentoniana. Línea media.
Go	Gonion - Punto de máxima convexidad del borde externo del ángulo de la mandíbula. Lateral.
Gn	Gnathion - Punto más anteroinferior de la sínfisis mandibular. Línea media.

- Xi** **Punto Xi** - Punto construido en el centro de la rama. Lateral.
- Ar** **Articular** -Punto en la intersección del borde posterior de la rama con la apófisis basilar del occipital. Lateral.
- SE** **Punto esfenotmoideo** - Punto correspondiente a la intersección de la gran asa del esfenoides con el suelo de la fosa craneal anterior.
- PM** **Plano maxilar posterior**- Definido por el punto esfenotmoideo y por la fisura pterigo-maxilar.
- FH** **Horizontal de Frankfurt.**

MORFOMETRÍA

- CVA** *Canonical Variate Analysis* (Análisis de Variantes Canónicas).
- DFA** *Discriminant Function Analysis* (Análisis de Función Discriminante).
- GM** *Geometric morphometrics* (Morfometría Geométrica).
- GMA** *Geometric morphometrics analysis* (Análisis de morfometría geométrica).
- EDMA** *Euclidean Distance Matrix Analysis* (Análisis de la Matriz de Distancia Euclidiana).
- FESA** *Finite Element Scaling Analysis* (Análisis Escalar de Elementos Finitos).
- GLS** *General Least Squares* (Método Generalizado de Mínimos Cuadrados).
- GPA** *Generalized Procrustes Analysis* (Análisis Generalizado de Procrustes).
- PCA** *Principal Components Analysis* (Análisis de Componentes Principales).
- PLS** *Partial Least Squares* (Análisis de Mínimos Cuadrados Parciales).
- RV** Coeficiente de Escoufier herramienta para analizar técnicas multivariadas.
- TPS** *Thin-plate Spline* (Deformación de Placa Delgada).

1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA Y GEOGRÁFICA





Para conocer el grado de homogeneidad racial de la población estudiada en el presente trabajo y su proveniencia, se realizará, en primer lugar una breve reseña de la colonización por el hombre moderno y la difusión de éste en el continente americano.

La llegada de los humanos al nuevo mundo es un tema polémico que ha suscitado diversas discusiones y teorías desde la llegada de los europeos al continente. La investigación de este proceso continúa abierta y sigue siendo fuente de numerosos interrogantes, especialmente en lo que se refiere a la época de las distintas corrientes migratorias, las rutas seguidas por los pobladores y el origen de éstos.

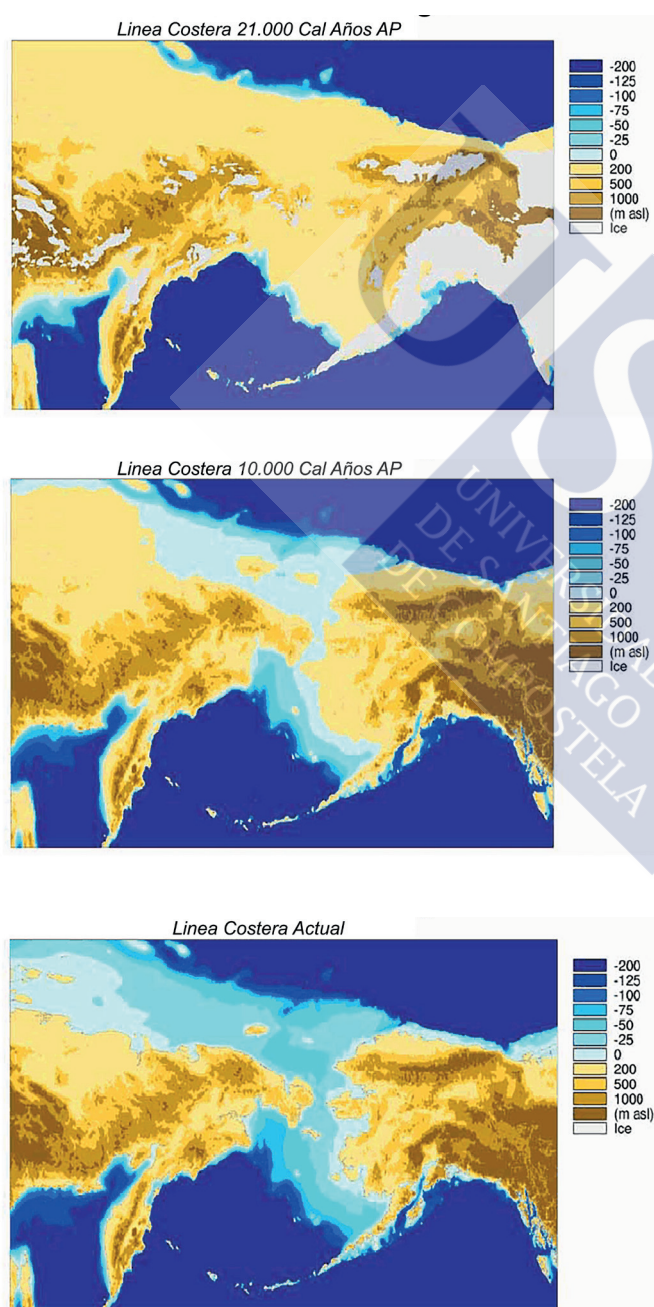


Fig.1.1 - Mapa Paleambiental de Beringia.

1.1 ÉPOCA

Una de las primeras hipótesis sobre la colonización de América fue enunciada por Alex Hrdlička (De Saint Pierre *et al.*, 2012) a partir del descubrimiento de la llamada cultura Clovis en el sitio de Blackwater Draw cerca del pequeño poblado de Clovis, Nuevo México en 1929 (Lima, 2006). La interpretación de este autor sobre la cultura Clovis promovió la teoría de los asentamientos de cazadores-recolectores, dedicados a la caza de grandes mamíferos migratorios, que realizarían una progresiva colonización norte-sur del continente. La fuente de información de esta cultura es fundamentalmente los restos de puntas de lanzas, y de flechas, con una antigüedad acotada entre los 11.200 y 10.800 BP (*Before present*-antes del presente) (radiocarbono) (Schurr, 2004; Waters *et al.*, 2011; Bravi, 2013). Este descubrimiento respaldó la teoría defendida por Hrdlička que en el primer poblamiento de América, los Paleoindios habían llegado al nuevo mundo a lo largo de la última glaciación, Wisconsin (Würm en Europa), a través de Beringia. Ésta, es una porción de tierra firme que unió Alaska y el Yukón del lado Americano y Siberia del lado Asiático durante las glaciaciones, y en donde en este momento se encuentra el estrecho de Bering. Los Paleoindios habían llegado desde el nordeste de Asia, cerca de 11.500 años antes del flo-

cimiento de la época Clovis y habrían sido los antepasados directos de los amerindios actuales (Lima, 2006; Rothhammer y Dillehay, 2009).

Uno de los temas más polémicos es ya no solo si sólo existió esta primera corriente migratoria, sino si previamente a ésta no habrían existido incursiones de pobladores previos a los “cazadores-recolectores”. La existencia de lo que se ha denominado una población pre-Clovis (Rothhammer y Dillehay, 2009).

En el extremo sur del continente, para algunos autores hay evidencias que permiten confirmar la presencia humana antes de la aparición de la cultura Clovis. Sitios como Monte Verde en Chile, ubicados unos 16.000 km al sur de la supuesta vía de poblamiento continental, son claros testimonios que refutan el paradigma de Clovis como primera cultura americana (Bravi, 2013). Una de las críticas que se hace a los defensores de los sitios Pre-Clovis es su ausencia en América del norte, aunque es posible que los procesos geomorfológicos ocurridos en el Pleistoceno tardío hayan sido desfavorables a la preservación de los depósitos arqueológicos. Aunque recientemente se han encontrado artefactos que mediante técnicas de datación han probado ser de la época pre-Clovis (Whitley y Dorn, 1993) en Texas y en otras localidades de América del Norte que han sido datados entre 16.000 – 14.250 BP, por lo que son más viejos que los asociados con sitios Clovis en América del Norte (12.900 – 12.550 BP) (Schurr, 2004).

1.2 RUTAS

Uno de los aspectos más relevantes referente a la población americana previa a la llegada de los europeos, ha sido el lograr establecer cuáles fueron las vías geográficas que permitieron el avance de los grupos migratorios y en qué grado estuvieron: o bien expeditas, o bien cerradas para el avance de según qué grupo, dependiendo de la época.

Recientemente, se ha verificado que el conocido como corredor libre de hielo, como paso hacia el sur, no fue habitable por los seres humanos hasta cerca de 13.000 años antes del presente (Misarti *et al.*,2012). Investigaciones geológicas recientes indican la existencia de zonas costeras sin hielo a oeste de la capa de hielo cordillerana 14.000 años atrás, mucho antes que el tiempo propuesto para la abertura de un corredor interior sin hielo (hace 11.000 años BP) (Yang *et al.*,2010).

Estos datos dan crédito a las hipótesis de que América fue poblada en un primer momento por vía marítima, probablemente siguiendo la costa del Pacífico, en lugar de a través de un corredor interior, entre cordilleras. Esta hipótesis de migración marítima no excluye la penetración hacia el interior del continente de grupos aislados. Confirma esta hipótesis la existencia del sitio arqueológico de Monte Verde habitado hace 14,5 ka BP (Dillehay, 1997), previo, por tanto, a la apertura del corredor libre de hielo entre la Cordillera y las Lauréntidas que se creó cuando las capas de hielo se retiraron (13.7 ka BP) (Misarti *et al.*,2012). Desde la década de los 90, varios estudios, han demostrado que partes de la costa noroeste funcionaban como un refugio libre de hielo (Misarti *et al.*,2012).

La dispersión de los primeros pobladores habría sido favorecida a lo largo de la costa, en el sentido norte/sur, y, desde ahí hacia el interior, en sentido oeste/este. En diferentes puntos del

continente y en distintas direcciones, sin necesariamente excluir una penetración posterior por el corredor libre de hielos, una vez abierto éste, estos movimientos migratorios provocarían la ocupación de las praderas centrales por los grupos de cazadores Clovis (Lima, 2006).

Los datos paleoambientales nos sugieren que las condiciones costeras deben haber sido menos extremas que las condiciones interiores, debido a la influencia moderadora de la corriente japonesa, que aportaba agua caliente subtropical a lo largo de la plataforma continental lo que habría provocado un entorno más templado y húmedo a lo largo de la costa. Las áreas que habrían servido como refugios tendrían una fauna variada capaz de alimentar grupos de humanos en épocas tan tempranas como el 16.000 BP (Admiraal, 2013). Una de las razones para la ausencia de evidencias arqueológicas de esta línea de poblamientos a lo largo de la costa oeste es que los refugios se encontrarían hoy a 150 metros por debajo del nivel del mar actual y son por lo tanto difíciles de investigar (Admiraal, 2013). Los detractores de la ruta costera refieren la ausencia de datos que indican la existencia de embarcaciones en la época (Admiraal, 2013). Varios autores refieren que la falta de pruebas del uso temprano de embarcaciones puede, en parte, ser explicada por el aumento del nivel del mar. Es conocido que el registro arqueológico de las poblaciones costeras en todo el mundo ha ido cambiando debido al progresivo aumento del nivel del mar ocurrido a lo largo del Holoceno (Admiraal, 2013). El modelo del corredor libre de hielo encaja perfectamente con el paradigma Clovis, con una orientación terrestre de la gran corriente migratoria norte-sur. Los defensores del modelo de migración costera promueven, por el contrario, una visión marítima con una adaptación a la costa y sus recursos faunísticos y el uso de embarcaciones en la prehistoria americana temprana (16.000 BP). Esta teoría ha tomado

mayor relevancia con los descubrimientos tempranos de Monte Verde (Chile) 1976-77 que fueron definitivamente confirmados en 1997 y que, a pesar de todo, continúan suscitando una amplia polémica entre los defensores de poblamientos Pre-Clovis y los defensores del paradigma Clovis (Admiraal, 2013).

En las rutas migratorias la tendencia actual es la de substituir el modelo unidireccional por una perspectiva multidireccional, admitiendo que pueden haber ocurrido múltiples migraciones, incluso de forma simultánea. (De Saint Pierre *et al.*, 2012). Sin embargo, casi todos los modelos admiten la relevancia de los refugios glaciales que existían en la zona de Beringia-Siberia oriental y su papel en la conformación de los grupos genéticos ancestrales de los nativos americanos (Battaglia, *et al.*, 2013). Hay autores que defienden que estas pobla-

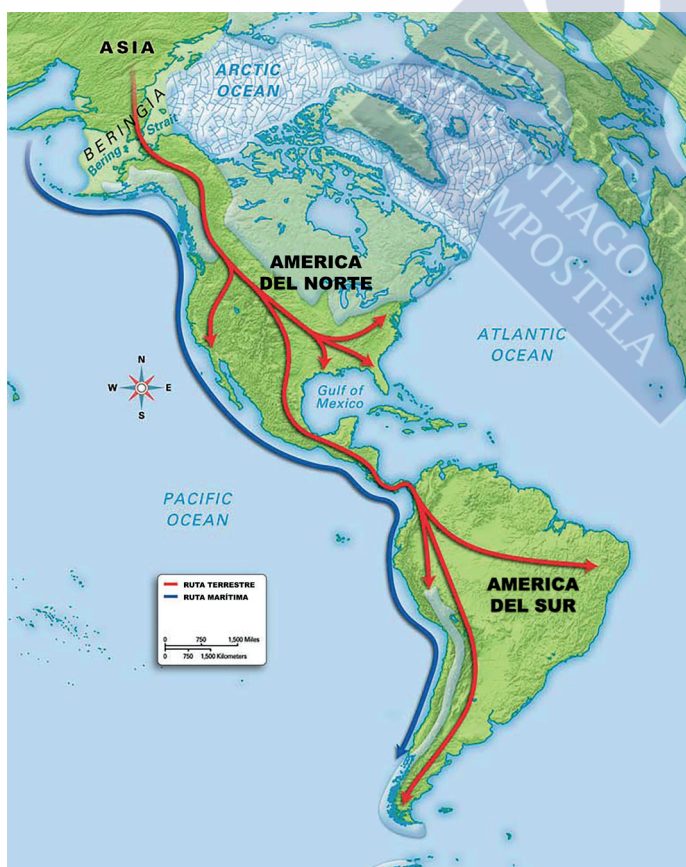


Fig.1.2 - Modelo de rutas migratorias.

ciones iniciales permanecieron durante un tiempo en la zona de Beringia mientras que otros defienden una entrada rápida en América a lo largo de una ruta costera (Fagundes *et al.*,2008; Barbieri *et al.*,2014), la única disponible en ese momento, poco antes del desarrollo y difusión de la Cultura Clovis, si bien otros como Fiedel (2000), defienden que los primeros colonizadores han entrado en el continente, mayoritariamente por una ruta interior no relacionada con los corredores costeros.

1.3 ORIGEN

Aunque el tema del origen de los pobladores americanos es un tema que provocó interés ya desde los años inmediatos a la llegada de los europeos, las explicaciones han sido, desde entonces tan fantásticas como dispares y originales. En estos últimos cien años se han propuesto varios modelos de colonización de América.

En 1986, Greenberg *et al.*, mediante una combinación de evidencias arqueológicas, lingüísticas y biológicas, propusieron el modelo de las tres olas según el cual los tres grupos lingüísticos nativos americanos (Amerindio, Athabaskans -Na-Dene y Eskimo-Aleutianos) habrían entrado en las Américas posteriormente a la última glaciación, en tres distintas oleadas de migraciones (Battaglia *et al.*,2013) proviniendo de Asia septentrional (Santos *et al.*,1999). De este modo el grupo conocido como los Amerindios formarían el primer grupo migratorio proveniente de Siberia, presumiblemente este sería un grupo homogéneo, con características dentales, genéticas y lingüísticas bien definidas. Habrían llegado a América hace aproximadamente 15.000-12.000 BP años y se extendiéndose desde el actual Canadá hasta el cono sur en un plazo de 2.000 años. Posteriormente a esta migración se produciría la migración de los Athabaskans (también conocido como Na-Dene) que colonizarían la costa noroeste del Pacífico, con una posible incursión en la zona de las praderas del medio oeste norteamericano. Por último la de los Eskimo-Aleutianos que colonizarían la zona más septentrional de norteamérica (Rothhammer y Dillehay, 2009). Este modelo fue cuestionado en términos de lingüística, biología y genética y nunca tuvo un impacto importante respecto a las hipótesis de poblamiento de la América del sur (Rothhammer y Dillehay, 2009). Las diferencias entre estos grupos se basan en un hipotético bloqueo del corredor libre de hielo, Alberta, durante miles de años que funcionaría como elemento aislante de los grupos al sur de los glaciares (los Amerindios) de aquellos situados aún en Beringia (que darán origen a los Na-Dene y esquimal).

Las evidencias genéticas más recientes han contradicho y complementado este modelo de triple migración. Así han surgido las siguientes teorías:

El modelo de una única ola (Merriwether *et al.*,1995; Bonatto y Salzano, 1997 a, b; Santos *et al.*,1999; Silva *et al.*,2002; Tarazona-Santos *et al.*,2001; Wang *et al.*,2007; Fagundes *et al.*,2008), que defiende que la diversidad molecular de todos los nativos americanos modernos puede converger en realidad en un escenario único, aunque complejo teniendo un papel crucial Beringia durante las primeras fases de ocupación (González-José *et al.*,2008).

El modelo de dos componentes (Neves y Pucciarelli,1991; Neves *et al.*,2003), que propone que la presencia de dos morfologías craneofaciales diferenciadas en América resulta por lo menos de dos olas cronológicamente separadas con diferentes fuentes poblacionales asiáticas distintas. Para ello se recurre a la terminología de PaleoAmericanos y Amerindios. Los Paleoamericanos serían sujetos que se parecen morfológicamente a los Australianos de nuestros días, Melanesios y Africanos Sub-saharianos y que siguieron las mismas rutas que usarían los Ame-

rindios (más similares a los Asiáticos) varios siglos después (Rothhammer y Dillehay, 2009; Pucciarelli, 2009). Sin embargo, en los últimas décadas, evidencias arqueológicas, lingüísticas y genéticas (Santos *et al.*, 1999; Fagundes *et al.*, 2008; Bodner *et al.*, 2012) han ofrecido escenarios supuestamente más congruentes para responder a las preguntas acerca de cuándo, y desde donde llegaron los primeros americanos y qué rutas migratorias siguieron. Es importante tener en cuenta que la ausencia de evidencia no es evidencia de ausencia (Admiraal, 2013) y que en la colonización de la América hay una serie de puntos conflictivos que se mantienen como elementos fundamentales de una gran incognita.

Entre ellos están:

- 1- La cronología de la colonización (quiénes fueron los primeros-Clovis o Pre-Clovis)
 - 2- La ruta (terrestre, costera o mixta)
 - 3- Las formas de subsistencia de las corrientes migratorias a lo largo de su desplazamiento
 - 4- Cómo se llevó a cabo el proceso de dispersión poblacional (de forma rápida o más lenta) y cómo influyó éste en la biología y comportamiento de los hombres del Pleistoceno tardío.
- Algo que es prácticamente admitido de forma unánime es el origen asiático de los primeros pobladores.

1.4 AMERICA DEL SUR

Los análisis genéticos han revelado que todos los nativos americanos, en Norte y Sudamérica, comparten un ancestro común asiático nororiental. Esto se sustenta en marcadores genéticos nucleares, el ADN mitocondrial y el cromosoma Y (Merriwether *et al.*, 1995; Goebel *et al.*, 2008; Fehren-Schmitz *et al.*, 2011). Y en la relativamente poca variación entre todas las poblaciones indígenas sudamericanas que sustenta la hipótesis de que todos los sudamericanos pueden tener su origen en una única población (Wang *et al.*, 2007) y que esta población vino de Asia y no de Melanesia, Australia, África, o Europa (Wang *et al.*, 2007; Rothhammer y Dillehay, 2009).

Estudios de la variabilidad del cromosoma Y en poblaciones nativas americanas han demostrado la existencia de un haplotipo norte-asiático fundador, originalmente llamado "II-A" (Santos *et al.*, 1999; Tarazona-Santos *et al.*, 2001).

El ADN mitocondrial y la porción no recombinante del cromosoma Y contienen una serie de diferentes marcadores que definen o identifican linajes genéticos específicos presentes en las poblaciones humanas. Mediante el análisis de variación de la secuencia en ellos,

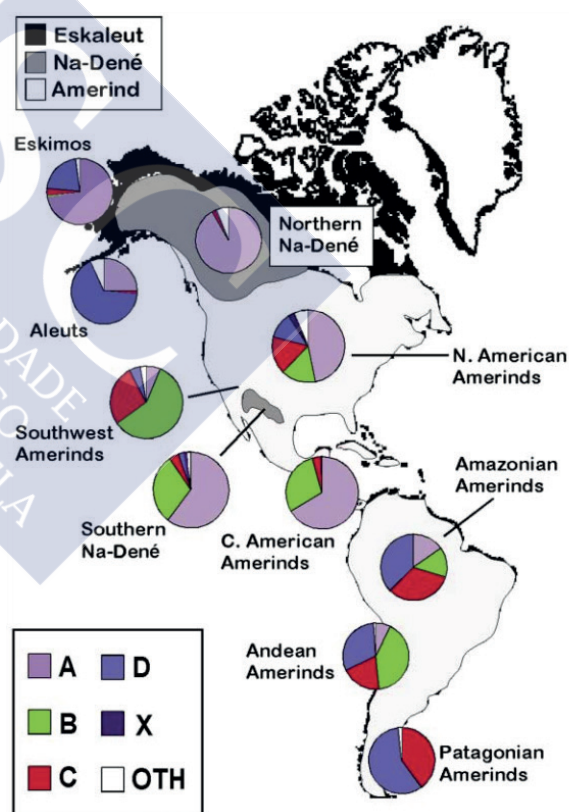


Fig.1.3 -Distribución de los haplogrupos de DNA mitocondrial dentro de las poblaciones Nativo Americanas. Los 5 haplogrupos aparecen en diferentes colores, el cuadro blanco "OTH" (del inglés "others", otros) indica aquellos haplogrupos que se hayan podido encontrar y que no pertenezcan a los 5 haplogrupos representados, los cuales provienen de África o de Europa. Imagen tomada de Schurr (2004).

uno puede identificar los linajes maternos y paternos presentes dentro de las poblaciones, caracterizar el grado de diversidad dentro de ellos y determinar la manera en la que se han extendido a los grupos vecinos (Schurr, 2004).

En lo que concierne al ADN mitocondrial se han identificado primero cuatro haplogrupos denominados A, B, C y D, el haplogrupo X ha sido identificado más tarde (Schurr, 2004; Bodner *et al.*, 2012). Para el cromosoma Y el cual solo se hereda por vía paterna se encontraron 2 haplogrupos el C y Q (Goebel *et al.*, 2008).

Es aceptado que los grupos que entraron hasta Beringia antes de la última glaciación se mantuvieron en la zona probablemente debido a la barrera ecológica, retrasando su penetración en América hasta el final de la última fase glacial (Bodner *et al.*, 2012). A partir de Beringia, se piensa que un pequeño grupo inicial colonizó América dando lugar a los patrones Panamericanos del ADN mitocondrial y otros marcadores genéticos (Bodner *et al.*, 2012). Eventos migratorios adicionales podrían explicar los distintos patrones de dispersión de algunos linajes nativos americanos menos frecuentes (Bodner *et al.*, 2012).

Para América del sur, no hay un consenso general en un modelo de poblamiento definido que quede perfectamente respaldado por los estudios de los datos del ADN mitocondrial ni de la porción no recombinante del cromosoma Y (Bodner *et al.*, 2012).

Así, la estructura genética ha quedado condicionada por los contrastes entre los ambientes de los Andes y la Amazonia y sus respectivas trayectorias culturales durante muchos milenios (Tarazona-Santos *et al.*, 2001; Barbieri *et al.*, 2014). Por ello, desde los inicios del siglo XXI, ha prevalecido una distinción entre "occidente" (antes denominada: la zona montañosa de los Andes y sus regiones circundantes) y "oriente" (antes: Tierras bajas amazónicas y regiones circundantes) en las discusiones de la variación genética de la población continental Sul Americana (Pucciarelli *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007).

Un posible escenario para el poblamiento de la parte oeste de Sudamérica podría ser que, después de pasar el Istmo de Panamá, la población se dividió en, por lo menos, dos subpoblaciones. Una de ellas migró directamente hacia el sur, a lo largo de la costa del pacífico hasta el extremo sur de Sudamérica, mientras que el segundo grupo se extendió primero hacia la llanura amazónica, vía la costa norte de Sudamérica o a lo largo de las estribaciones orientales de los Andes y, luego, pobló las serranías andinas desde el este. Esta hipótesis se sustenta con datos geológicos que verifican la existencia de barreras físicas en la parte más alta de los Andes (los glaciares), lo cual hace que una colonización de los Andes desde la costa oeste durante el Pleistoceno Final sea menos verosímil. No obstante, considerando el bajo número de datos de ADN antiguo disponibles y el hecho de que son solo mitocondriales, este escenario no se puede probar estadísticamente en la actualidad (Fehren-Schmitz *et al.*, 2011).

En los últimos años, apoyado por estudios genéticos, se ha verificando que la ruta más probable de diseminación en Sudamérica fue la costera (Fuselli *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2010), coincide con esto la relativa similitud genética de las poblaciones andinas con las poblaciones de Mesoamérica lo que sería compatible con una colonización temprana costera del Pacífico (Wang *et al.*, 2007). Se constata también, que los registros arqueológico del Pleistoceno tardío en América del sur y del norte difieren en muchos sentidos siendo de referir entre ellos la ausencia en América del sur de un estilo de herramientas de piedra del tipo Clovis, la presencia de ambientes variados y grandes contrastes en el hemisferio sur que han favorecido el

establecimiento de distintas tradiciones culturales regionales desde el principio de la dispersión del ser humano. Además, las extensas capas de hielo que cubrían altas latitudes condicionaban el movimiento de los colonizadores en Norte de América a diferencia de América del sur donde el efecto glaciario era menos relevante (Rothhammer y Dillehay, 2009).

Un posible esquema de dispersión humana en América del sur se podría basar en cazadores y recolectores que emigraron a América del Sur vía el Istmo de Panamá y que podrían haber entrado en las montañas andinas a través de ríos, valles de los ríos Cauca y Magdalena situados en Colombia (Rothhammer y Dillehay, 2009).

Después de adaptados a las condiciones medio ambientales existirían pocas barreras en el movimiento hacia el sur, aunque algunas zonas estuvieran cubiertas por glaciares, en realidad, estos estaban en retroceso, quedando confinados a áreas aisladas de alta altitud y latitud (Rothhammer y Dillehay, 2009).

En 2013, Battaglia *et al.*, resumieron los eventos principales que contribuyeron a la estructura genética de las poblaciones americanas modernas en tres: 1.- la entrada en las Américas de grupos asiáticos, 2.- los movimientos internos determinados por la expansión demográfica atribuibles a los avances agrícolas o al florecimiento de los grandes imperios nativos americanos y, finalmente, 3.- el flujo genético aportado por los europeos y africanos postcontacto.

1.5 CULTURAS PERUANAS

Antes del inicio de la desglaciación, hace aproximadamente cerca de 15.000 a 13.000 años, los primeros habitantes de América del sur estaban confinados en los terrenos abiertos de las planicies costeras. Los movimientos migratorios hacia la región más alta de los Andes Centrales y las latitudes de la Patagonia Austral no se han producido hasta 11.000 a 10.000 años después de la desglaciación (Dillehay, 1999). Autores como Lumbreras *et al.*, 2008, pág.45 defienden que si bien los estudios existentes permiten fijar la presencia humana en coincidencia con el proceso de regresión glacial entre 14 y 12 mil años antes de nuestra era, nada hubiera impedido que los cazadores-recolectores llegaran antes de esta época, en plena glaciación, puesto que aún en los períodos de mayor enfriamiento, existían valles y bosques que podían ser utilizados por el ser humano.

En América del sur, la evidencia arqueológica indica que el continente fue ocupado por varios grupos distintos en el final del Pleistoceno cerca de 13.000–11.000 BP (Cione *et al.*, 2009; Kuentz *et al.*, 2011). La colonización se inició por la costa mientras que las áreas de mayor elevación se cree que no fueron colonizadas hasta después de 11.000 años BP (Kuentz *et al.*, 2011). La dispersión de los seres humanos en América del sur fue muy rápida y hay autores que defienden que los seres humanos se desplazaron desde Beringia hasta el centro de Chile en 250 años (Cione *et al.*, 2009).

Entre 10.000 y 11.000 años atrás América del sur estuvo también sujeta a varios cambios considerados como típicos de la época del Pleistoceno como el comienzo de la explotación de los recursos costeros y el consiguiente cambio de tecnologías marítimas, también concentración demográfica en grandes cuencas fluviales, y la práctica de la modificación de plantas y de la distribución de los animales (Dillehay, 1999).

Otros se producen más tarde, entre 9.000 y 10.000 años BP e incluyen la mayoría de los cam-



bios típicos del Arcaico Temprano (o Neolítico) como el aumento de la densidad poblacional de unos sitios y el abandono de otros, el incremento de la manipulación de las plantas, la explotación intensiva de los recursos costeros, una mayor diversificación tecnológica, y la aparición de prácticas rituales (Dillehay, 1999).

1.5.1 PERIODO ARCAICO

Los primeros pobladores del territorio peruano podrían haber llegado persiguiendo a animales en su migración hacia el sur, fueron cazadores-recolectores nómadas pero organizados en grupos, especializados en la caza de animales y en la pesca, a lo largo de las costas peruanas (Lumbreras *et al.*,2008). Los restos humanos en el pasado presedentario de los Andes, desde el final del pleistoceno hasta el inicio del Holoceno, son muy raros. Alrededor de 10.000 BP se inició una era de sedentarismo precario con asentamientos pequeños (Arkush y Tung, 2013).

El yacimiento más antiguo se sitúa en el nivel más temprano de la cueva de Jaywamachay, en Ayacucho, con el hallazgo de un fragmento de una punta lítica con una datación aproximada circa 8.000 a.C. (Lumbreras *et al.*,2008). Las puntas sudamericanas no son iguales a las de Clovis pero tienen muchos elementos en común, incluido el detalle de una ligera acanaladura a lo largo del pedúnculo de las puntas de El Inga, que es un detalle tecnológico que estas comparten con las de Clovis (Lumbreras *et al.*,2008).

Los restos arqueológicos más relevantes en el periodo temprano aparecen en Perú entre los 7.000 y 10.000 años a.C. dispersos por todo el territorio y pertenecen a sociedades recolectoras de alimentos. Sin embargo, hacia el 5.000 a. C. estos pobladores empezaron a hacerse sedentarios estableciéndose en las costas, aprovechando la pesca y la recolección de mariscos (Arkush y Tung, 2013) e iniciando un primordio de asentamientos agrícolas con el desarrollo inicial de viviendas, dada la escasez de cuevas en la geografía abierta de la costa. Estas primeras viviendas, encontradas en Chilca al sur de Lima, estaban constituidas por troncos de juncos y chozas de formas cónicas.

SISTEMAS CRONOLÓGICOS PARA LA PERIODIZACIÓN DEL ANTIGUO PERÚ

Fechas aproximadas	Rowe (1960)	Lumbreras (1969, 2008)	
1532 1476	Horizonte Tardío	Imperio Tawantinsuyo	
1440	Intermedio Tardío	Estados Regionales	
1000		Imperio Wari	
900	Horizonte Medio	Desarrollos Regionales	
600			
550	Intermedio Temprano	Desarrollos Regionales	
200			
100 d.C.			
0	Horizonte Temprano	Forma t i v o	Formativo Superior
100 a.C.			Formativo Medio
200 a.C.			Formativo Inferior
400 a.C.	Periodo Inicial	A r c a i c o	Arcaico Superior o Protoformativo
700 a.C.			Arcaico Inferior
1000 a.C.	P r e - c e r á m i c o	A r c a i c o	Lítico
1200 a.C.			
1500 a.C.			
1700 a.C.			
2000 a.C.	P r e - c e r á m i c o	A r c a i c o	Lítico
3000 a.C.			
5000 / 6000 a.C.			
7600 a.C.			
8000 a.C.	P r e - c e r á m i c o	A r c a i c o	Lítico
¿15000? a.C.			

Fig.1.4 -Modificado de Lumbreras *et al.*,2008

Posteriormente se levantaron centros arquitectónicos pequeños como Aspero (situado en la mar-



gen del río Supe y adyacente al Océano Pacífico), el Paraíso, etc (Stanish, 2001) y esta forma monumental de construir tendrá su continuación, con técnicas más sofisticadas, en la cultura Chavín (Willey, 1955) siendo que esta cultura de origen amazónico se desarrollará definitivamente en la región andina. Surgieron también conglomerados de viviendas, palacios y monumentos funerarios. Estas primeras culturas que se desarrollaron, en la costa y en la sierra peruana, desarrollaron técnicas de agricultura más avanzadas realizando canales de irrigación y utilizando fertilizantes naturales (Stanish, 2001).

En estos inicios fueron numerosas las migraciones de gente de las regiones alto-andinas a tierras bajas templadas llegando hasta las zonas de la costa en oleadas sucesivas, obligados por motivos económicos, climáticos y políticos. Con la aparición de alimentos como el maíz y otros productos cultivables, surge una transformación revolucionaria en el sistema de alimentación. Los hombres de los Andes, de características resistentes, que supieron domesticar tantas y tan variadas especies animales y vegetales, tuvieron necesidad de extender sus dominios y buscar nuevas tierras que les ofrecieran mejores condiciones de vida; desarrollando de este modo el rico cronograma de las culturas peruanas a alguna de las cuales pertenecen los individuos estudiados en el presente trabajo.

1.5.2 PERIODO FORMATIVO

Los mayores desarrollos de esta época consisten en el cambio de las relaciones entre poblaciones, su aumento en número (Arkush y Tung, 2013) y también en un cambio de su relación con la tierra. Irrumpe la cerámica que caracterizará a las culturas de esta zona de América y que será una de las señas identitarias de algunas de ellas. Los elementos cerámicos alcanzan una gran difusión de forma paralela a la tecnología agrícola encaminada a crear una red de canales de riego en las planicies desérticas comprendidas entre la costa y la montaña.

1.5.2.1 PERIODO FORMATIVO TEMPRANO Y MEDIO (1.500–800 a.C.)

Las culturas del Periodo Formativo Temprano se desarrollan en la costa peruana. La población se ubica en pequeñas aldeas agrícolas. Es dudoso si los complejos canales de riego, que van hacer posible el sostenimiento de las densas poblaciones de periodos posteriores, ya existían en este momento (Willey, 1955).

Se produce una expansión de los asentamientos en los valles de la costa para el desarrollo de la agricultura de irrigación (Arkush y Tung, 2013). Los centros monumentales están presentes en las zonas bajas de los valles y los elementos defensivos están casi completamente ausentes.

Estas fases del período temprano del Perú están vinculadas a un estilo sofisticado de arte, el Chavín (Willey, 1955).

El estilo Chavín, con su especializada iconografía felino-condor, ha cubierto todo el norte y centro del Perú en el Horizonte Temprano, variando en su expresión desde la monumental talla de piedra del sitio arqueológico de Chavín de Huántar hasta la decoración cerámica más presente en los valles costeros (Willey, 1955).



1.5.2.2 PERIODO FORMATIVO TARDIO

El estilo Chavin y estilos relacionados alcanzan su auge (Arkush y Tung, 2013).

A pesar de cierta controversia sobre las definiciones y cronología, los arqueólogos consensualmente reconocen tres Horizontes temporales en los Andes y en la costa del Pacífico (temprano, medio y tardío). Cada uno de los horizontes corresponde a períodos de dispersión cultural que implican una amplia área geográfica (Scliar *et al.*,2014).

1.5.3 PERIODO INTERMEDIO TEMPRANO (PIT) (200 a.C. – 550 d.C.)



Fig.1.5 -Cerámica Moche. Parálisis Facial. Colección Museo Larco. Lima, Peru.

COSTA NORTE (PIT)

La Cultura Mochica: Los Moche (o Cultura Mochica) se reconoce a menudo como el primer estado indígena que ha surgido en los Andes (Vaughn, 2006; Quilter *et al.*,2012). Fueron estudiados en un primer momento por Max Uhle, si bien ha sido Larco Hoyle el padre de la arqueología mochica el primero que, basado en las cerámicas moche, ha establecido la cronología moche (Chapdelaine, 2011; Quilter *et al.*,2012). Es una cultura que se desarrolla en la costa norte de Peru. Hay autores que refieren la existencia de dos polos de desarrollo Moche, un más al norte y otro al sur (Jiménez, 1997; Stanish, 2001).

Construyeron varias pirámides rituales, han llegado hasta nosotros la del Sol y la de la Luna como centros ceremoniales religiosos. Desarrollaron una cerámica fina que sorprende por su realismo en las formas antropomorfas y por su decoración con vivos colores. La cerámica moche es un elemento fundamental para el conocimiento de la sociedad, su estructura, la caracterización de sus gentes, su aspecto físico, sus creencias, sus enfermedades, su vida cotidiana, el medio natural y su interacción con él y un largo etcétera (Lumbreras *et al.*,2008). La fascinación por la cultura mochica se ha incrementado en 1987 con el descubrimiento de las tumbas reales de El Señor de Sipán (Chapdelaine, 2011).

COSTA SUR (PIT)

La Nazca: se estableció en los valles de la costa sur, en un territorio que comprendía los valles de Chincha, Ica, Palpa, Nazca y Yauca; el núcleo central era el valle de Nazca donde se construyó Cahuachi, considerada la capital (Lumbreras *et al.*,2008, pág.245) y que funcionaba también como un centro ceremonial, fue el foco de peregrinaciones regionales. La mayoría de la población Nazca vivió en pequeñas aldeas rurales y sus trabajos cerámicos gozaron de una brillante diversidad de colores, plasmando animales, figuras geométricas y antropomorfas. Tiene sus raíces en la cultura de los pobladores de la península de Paracas a la que pertenecerán

algunos de los individuos del presente estudio.

1.5.4 EL HORIZONTE MEDIO (HM) (550 – 900 d.C.)

Las dos entidades representativas del Horizonte Medio fueron Wari (a.D. 600–1.000/1.100) y Tiwanaku (a.D. 550 –1.000/1100) que coexisten en el tiempo (Lumbreras *et al.*,2008, pág.248; Arkush y Tung, 2013). En su estructura política, los Wari fueron “un Estado militarista disuasivo, persuasivo y conquistador por excelencia, teocrático a posteriori; mientras que el Estado Tiwanaku fue de naturaleza teocrática desde su inicio”. Los centros urbanos en ambas culturas se han caracterizado por la construcción de grandes conglomerados arquitectónicos y por población estratificada, que participaba de manera distinta en la producción y en los servicios (Lumbreras *et al.*,2008, pág.248). Su iconografía es tan similar que ambas fueron inicialmente confundidas, pero sin embargo presentan territorios y trayectorias distintas (Stanish, 2001; Beresford-Jones *et al.*,2013).

Tiahuanaco: se establecieron en la sierra peruana, fue el lugar donde se inicio el culto al sol, tuvieron una gran arquitectura ceremonial, con edificios de carácter religioso, construidos con piedras, de arenisca y basalto, cortadas y encajadas entre sí perfectamente, sin necesidad de argamasa (Isbell, 2008).

Huari o Wari 550 – 900 d.C. (Lumbreras *et al.*,2008, pág.249): es el fin de las culturas clásicas en el Perú, siendo la que antecedió a los Incas. La cultura Wari, que se desarrolló teniendo como centro al valle de Ayacucho de la sierra central del Perú, ha sido interpretada como un estado que logró controlar gran parte de los Andes centrales durante el periodo conocido como Horizonte Medio (Valdez *et al.*,2006).

En el momento del colapso del imperio Wari y Tiahuanaco cerca del 1000/1100 a.D., surgen varias sociedades complejas en los valles costeros centrales y del norte. Los más importantes son Lambayeque (Sican) y el imperio Chimú que a posteriori conquista Sican y otras poblaciones costeras (Arkush y Tung, 2013).

1.5.5 EL PERIODO INTERMEDIO TARDIO (1.000–1.400 d.C.)

El Periodo Intermedio Tardío se sitúa entre los estados Wari y Tiwanaku y el imperio Inca y se caracteriza por el período de los grandes reinos locales de la costa, tales como el Chimú y la Chíncha y por varios Estados de las tierras altas que fueron, posteriormente, invadidos por el Imperio Inca (Willey, 1955).

El imperio Chimú cuya capital fue Chan Chan, ha florecido entre 1200 -1470 d.C. Siendo después conquistado y absorbido por el imperio Inca. Sin embargo, fueron imperios gobernados por dinastías divinas o semi-divinas, militaristas y con una organización económica similar (Conrad, 1981).

En 1490, el Reino Chimú fue derrotado por la dinastía Inca liderada por el gran guerrero Túpac Yupanqui, hijo y heredero del gobernante Inca Pachacutec. Pachacutec era considerado una especie de Alejandro Magno Andino. Él y su hijo Topa lograron someter a todos sus rivales de Ecuador a Chile. Sin embargo, su imperio fue conquistado y destruido a la llegada de Francisco



Pizarro (Marino y Gonzales-Portillo, 2000).

1.5.6 HORIZONTE TARDIO

La civilización Inca (1.400–1.532 d.C.): se desarrolló en el imperio del Tahuantinsuyo, ocupando más de 5000 km de longitud en la dorsal de América del sur, comprendiendo lo que hoy es Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Centro y Norte de Chile, así como la región nor-occidental de Argentina. Llegó a tener más de 15 millones de habitantes. Su capital fue el Cuzco (“el ombligo del mundo” en quechua) (Andrushko y Torres, 2011). Fue una sociedad jerarquizada de carácter piramidal: el vértice ocupado por el Inca, hijo del sol, revestido de carácter divino (Lastres y Cabieses, 1959, pág. 267), en el estrato inmediatamente inferior se situaban el clero y la nobleza, y, en la base de la pirámide, el pueblo y los siervos (Lastres y Cabieses, 1959). Su religión estaba muy jerarquizada con el culto al dios Wiracocha o el Hacedor y otras deidades de menor entidad como las montañas (apus), a las que se le ofrecían alimentos y rendían sacrificios de animales, y con menor frecuencia de víctimas humanas.

Muchas de las estrategias militares utilizadas por el imperio Inca para incorporar y administrar nuevos territorios y grupos étnicos fueron desarrolladas entre el 1.000 y el 1.400 d.C. cuando se fue formando un estado centralizado en el valle de Cuzco (Bauer y Covey, 2002).

La administración, comunicación y tráfico de mercancías en el imperio Inca se desarrolló a través de una extensa red de caminos y puentes en un medio realmente hostil, funcionando esta red como un instrumento político de penetración, unificación y de control de las provincias (Lastres y Cabieses, 1959, pág. 269). Dos vías paralelas, una en la costa y otra en la sierra, recorrían el imperio longitudinalmente de Quito a Chile, en este medio de grandes diferencias de altitud los rebaños de llamas desempeñaron el papel de animal de carga. Un estudio actual de la red de carreteras Inca revela al menos 23.139 km de carreteras siendo que la original completa tendría cerca de 40.000 km y habría resultado también de la incorporación de carreteras existentes antes del imperio Inca (Burger, 1989).

Sus construcciones religiosas y civiles algunas de carácter monumental son testimonio de una refinada técnica para el aparejamiento de muros resistentes a los seismos y sin argamasa en las juntas. Los incas promovieron el cultivo en terrazas para evitar la erosión y la pérdida de la tierra vegetal en un medio agreste y con grandes pendientes. Conocieron los solsticios y un calendario de 365 días, utilizaron también una abundante farmacopea botánica, con contribuciones inapreciables a la medicina occidental con diversas plantas como la coca, y preparados como el bálsamo de Perú, (recogido en su libro sobre odontología por Pierre Fauchard siglos después) y la corteza de quinina para combatir el paludismo (Lastres y Cabieses, 1959, pág. 277-278). Lo más sorprendente fue que llegaron a emplear las trepanaciones craneanas en sus prácticas médicas (Lastres y Cabieses, 1959 a y b). Impusieron una integración política, económica y lingüística, con un idioma oficial, el quechua. Huayna Capac fue el último inca antes de la invasión española; al fallecimiento de éste sus dos herederos Huascar y Atahualpa se disputaron el trono; esta guerra civil coincidió con la llegada de un exiguo grupo de españoles al mando de Pizarro y la suma de acontecimientos tras los bochornosos sucesos de Cajamarca en el 1532 supuso el rápido y total desmoronamiento del Tahuantinsuyo.

Cuando los europeos llegaron a América del sur en el siglo XVI el Imperio Inca dominaba



la región andina y tenía una densidad de población y los niveles de desarrollo socio-económico sin precedentes en otras partes de América del sur (Scliar *et al.*,2014). En el momento del contacto con los europeos la práctica de deformación craneal estaba generalizada en el área andina. Los exploradores españoles escribieron que los Incas utilizaban la conformación craneal para marcar la elite y como un medio para diferenciar a los ciudadanos de su imperio (Torres-Rouff y Yablonsky, 2005). De las Casas (1892, págs. 174-175) observó que cada provincia mantiene la antigua costumbre de formar las cabezas de la misma manera de sus vecinos.

El Imperio de los Incas estaba plenamente vigente, como estructura administrativa, a la llegada de los españoles. Cientos de años antes de esta estructura unificadora Perú había estado poblado por pueblos primitivos que estaban constantemente en guerra entre sí y formaban parte de una sucesión de las culturas que se remontan al año 2000 a.C. Las más importantes entre ellas eran la Chavin-Sechin (900 a 200 a.C.), los Tiahuanaco-Huari (750 a.C. a 1000 d.C.), y la cultura Moche-Chimu (200 a.C. a 1400 d.C.) (Marino y Gonzales-Portillo, 2000). Uno de los mayores logros de estas culturas fue su genio artístico. Fabricaron exquisitos adornos en oro, plata y piedras preciosas, así como cerámica durante varios períodos estilísticos, especialmente en la cultura Moche (Marino y Gonzales-Portillo, 2000). Su arte nos dice más de lo que se conoce acerca de estas culturas.; estas "ayudas visuales" compensan la falta de una lengua escrita y revelan su vida cotidiana (Marino y Gonzales-Portillo, 2000). Los textos escritos nos han llegado a través de las crónicas de los colonizadores españoles. Estas son una mezcla de historia y literatura, de realidad y ficción y por ello son un material de difícil manejo debido a esa estrecha línea que separa el mundo real del imaginario (Portugal y Morais, 2010).

El mundo incaico es dueño de una rica mitología, pero sus "mitos" han llegado hasta nosotros por medio de crónicas hechas por españoles o indígenas que no sabemos hasta qué punto han distorsionado el discurso pré-hispanico o si esos mitos corresponden a reinterpretaciones nativas de su historia (Portugal y Morais, 2010).

Entre los relatos más conocidos se pueden destacar los de Francisco de Xerez, Hernando Pizarro, Cristóbal de Mena, Juan Ruiz de Arce, Pedro Sancho de Hoz, Diego de Trujillo, Miguel de Estete, Pedro Pizarro y también las crónicas de Cieza de Leon, Agustín de Zárate y Garcilaso de la Vega que nos describen el mundo pre-hispánico y el período colonial inicial (Portugal *et al.*,2010)

Hernando Pizarro, Cristóbal de Mena, Francisco Xerez, Pedro Sancho de Hoz, Miguel de Estete, Juan Ruiz de Arce, Diego de Trujillo y Pedro Pizarro han sido los primeros en describir la conquista del Tahuantinsuyu. El tipo de textos que han producido si bien se pueden considerar dentro del género de los cronistas de las Indias, lo que son en realidad son "relaciones" que reflejan el testimonio directo de participantes de la conquista (Portugal y Morais, 2010).

En el artículo de Portugal y Morais, 2010 se refiere que Juan José Vega autor de Los incas frente a España. Las guerras de la resistencia, 1531-1544. Lima: Peisa, 1992 afirma que la conquista duró 13 años, siendo la primera fase la conquista de Cajamarca y el aprisionamiento de Atahualpa, y la segunda la lucha contra Manco Inca, que dirigió a la elite cuzqueña contra la dominación española de 1536 a 1544.









2. DEFORMACIÓN CRANEAL

Revisión histórica y tipología





Algunos de los cráneos que se estudiarán en este trabajo son cráneos que han recibido una deformación intencional, es decir que el crecimiento y el desarrollo de sus huesos fue modificado artificialmente con la intención de dejar la bóveda craneal conformada de una manera determinada. La deformación craneal es una de las muchas alteraciones de forma que por causas étnico-anropológicas se ha practicado dentro de la especie humana desde tiempos muy remotos, de una manera bastante generalizada, aunque, en nuestro medio parezca algo bastante extraño y ligado de manera directa con las civilizaciones precolombinas. Su estudio se encuentra reflejado en una extensa literatura y constituye un tema de investigación abierto, tanto desde el punto de vista antropológico, físico o cultural (Cocilovo y Varela, 2010), como elemento para el estudio o la inferencia sobre el proceso de crecimiento craneal en un entorno adverso que modifica radicalmente la disposición espacial en el crecimiento de los huesos de la bóveda craneal.

Como veremos, en esta breve introducción sobre este tema, la deformación craneal es una práctica de la que tenemos noticias desde tiempos remotos y que se ha llevado a cabo en casi todo el planeta, y que, incluso, ha sobrevivido hasta nuestros días.

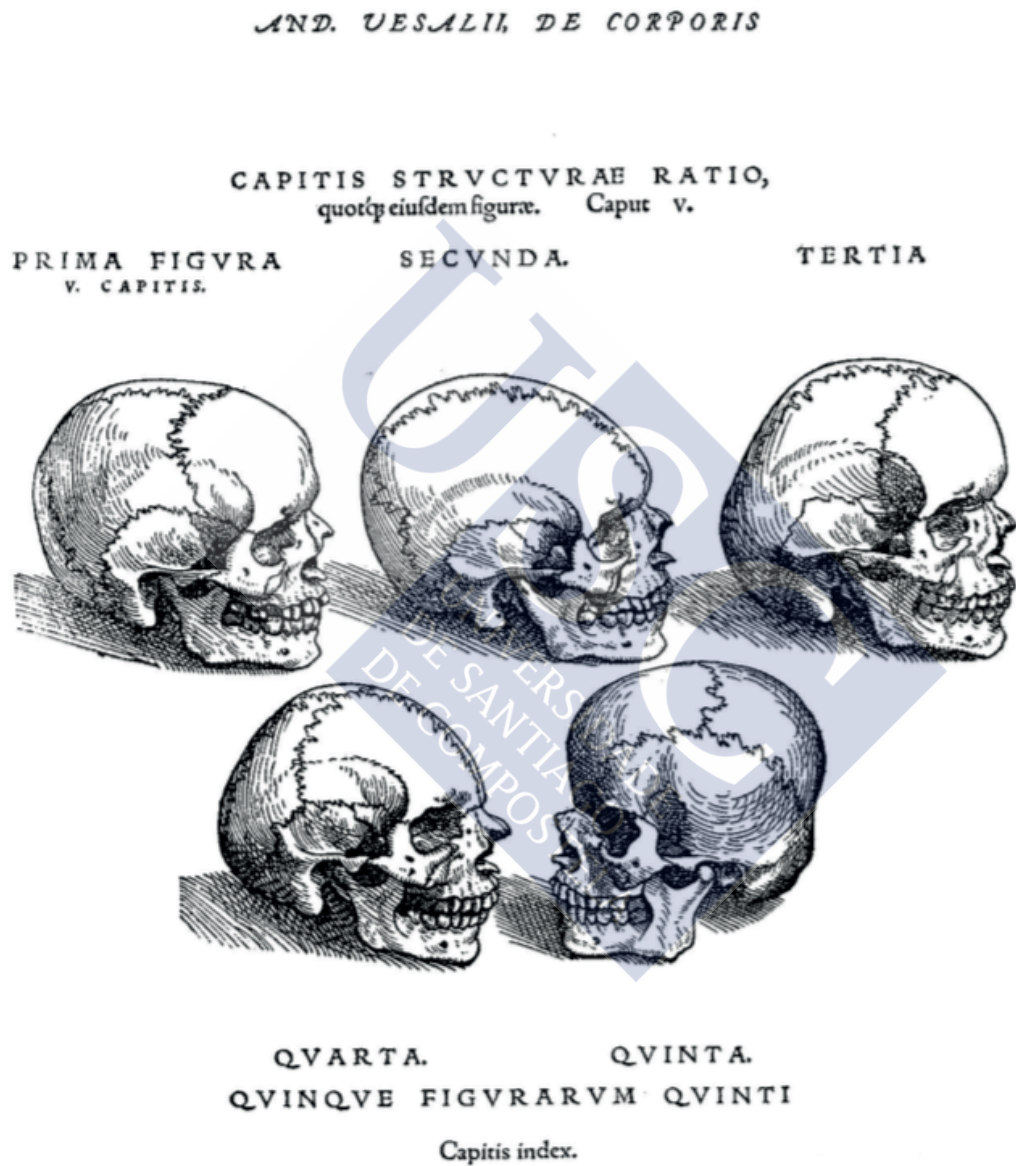
2.1 REVISIÓN HISTÓRICA

Las primeras sospechas de la deformación cefálica son varios cráneos de Neandertales con posible deformación que datan de hace 45.000 años y fueron hallados en la cueva Shanidar (Aufferdeide y Rodríguez Martín, 2003). Para otros autores los vestigios más antiguos provienen de los restos encontrados en un yacimiento datado en el paleolítico superior (23,000-18,000 a.C.) en una cueva cerca de Zhou-Kou-Tien (China) (Thomas, 2013). Lo que sí es un hecho es que la primera referencia histórica relevante acerca de estos hechos está recogida en el Corpus Hipocrático, en el Libro de los Aires, las Aguas y los Lugares, donde se comenta la existencia de una tribu de macrocéfalos que habitan el Pontus Euxinus (ribera del Mar Negro península de Crimea); estas tribus procedían de manera ritual a deformarse las cabezas artificialmente (Hipocrat, 1955, pág. 126).

Posterior a esta noticia, y también referido a un pueblo indoeuropeo, son los inventarios del censo de la dinastía Han (208 a.C.) que describen a los Kuchean, un pueblo indoeuropeo que vivía en los límites del imperio Chino y que tenía la costumbre de deformar tabularmente los cráneos de los recién nacidos (Mallory, 1989, pág. 59). También en la zona del Cáucaso y el Danubio, Estrabón, en su conocida recopilación geográfica, comenta la presencia de los Sigios que deformaban las frentes (Dembo y Imbelloni, 1938, pág. 233) ¹. Dembo e Imbelloni en su monografía también sostienen que la deformación craneal ha estado presente en la civilización

¹ Strabo. *Strabonis geographica*. Ed C. Müller & F. Dübner; Paris, 1853. pág. 358. Citado por Dembo A. e Imbelloni J. *Deformaciones intencionales del cuerpo humano de carácter étnico*. José Anesi. 1938. pág. 233.

egipcia, lo cual podría ser compatible con algunos bajo relieves de Akennathon, si bien nunca podemos estar seguros de que no es un tratamiento de estilo escultórico. En las regiones del Caspio, los nómadas llamados Yürük que viven en el sur de Anatolia aún continuaban practicando, en el siglo XX, la deformación artificial de la cabeza (Özbek, 2001). También los Persas y los Mongoles han realizado deformaciones craneales rituales (Thomas, 2013).



PRIMA figura, naturalis capitis seu calvariae forma, oblongam sphaeram utrinque leuiter depressam referens, & anteriorius posterioriusq; extuberans, delineatur.
Secunda, primam non naturalem capitis figuram demonstrat, in qua anterior eminentia perijt.
Tertia, secundam capitis figuram non naturalem ostendit, in qua anterior eminentia deperditur.
Quarta, tertia non naturalis capitis figura indicatur, in qua utrinque tuberculum, anterior nimirum & posteriorius, intercidit.
Quinta, quartam non naturalem capitis figuram expressimus, in qua amba naturalis figurae eminentiae ad latera, non autem antrosum retrosumq; spectant.

Fig. 2.1 -Morfología craneal, incluyendo cráneos deformados, según Vesalio (De corporis humani fabrica libris septem).

La que sí parece ser la primera representación gráfica con intención descriptiva y morfológica, en un libro de medicina occidental de un hecho de deformación craneal, es la breve clasificación de cráneos con distintas deformaciones y alteraciones de las suturas craneales que realiza Vesalio (1555) en su tratado de anatomía pues en el pie de figura que añade al grabado comenta que posiblemente la configuración anómala de la bóveda se deba a la acción de elementos deformadores artificiales. Vesalio tenía conocimiento de que en Bélgica las madres deformaban con vendajes las cabezas de sus hijos. Otros anatomistas de la época hicieron observaciones similares como la de Lauremberg (1634),² que hace referencia a costumbres deformadoras entre los pobladores de Hamburgo. Estas deformaciones en su mayoría serán producidas por el tipo de vendaje al que se sometía a los recién nacidos. La persistencia de este tipo de deformaciones ha llegado hasta nuestros días, siendo ya un hecho anecdótico las descripciones de deformaciones craneales practicadas en Francia en el siglo XIX, en la zona de los Alpes, y en la región de Toulouse, hasta los albores del siglo XX, habiendo generado una abundante polémica entre los médicos franceses de la época napoleónica y del imperio³. Posiblemente, estas deformaciones tengan bastante que ver con la conformación craneana dinárica, descrita por Enlow y Hans (1996, pág. 128-9), aunque los autores no parecen muy seguros de que este tipo de bóveda craneal pueda estar relacionada con procedimientos deformadores intencionales.

Por todo lo expuesto anteriormente, cabe afirmar que la deformación craneal se ha practicado a lo largo de la historia de la humanidad en muchas civilizaciones. Ahora bien, la razón de la deformación ya no es un asunto tan claro. Las razones por las que estos pueblos decidían deformar los cráneos o bien, aceptaban la deformación craneal que se producía como un efecto del empleo de determinadas cunas o métodos de vendaje para inmovilizar al neonato, es algo que permanece dentro de la polémica. Desde deformaciones hechas con la intención de incrementar el grosor de la calota y hacer más resistentes a sus poseedores frente a los traumatismos y dotarlos de mayor audacia y resistencia en el combate, hasta la intención de controlar la rebeldía de los pueblos sometidos produciendo cierta tara entre ellos. De todo se ha recogido desde el punto de vista de la antropología cultural: posibles formas que libran al poseedor de la influencia de malos espíritus, la posibilidad de hacerse a un espíritu protector y tener la cara de “luna llena”. Desde luego lo más posible sea que el efecto estético del resultado haya sido el factor principal. Se ha hablado del aspecto monstruoso que podía dar esta morfología craneal a los guerreros que además lo incrementaban con peinados y tatuajes. Eric Dingwall (1931), en su excelente libro sobre deformación craneal, procede a realizar un estudio pormenorizado en cada una de las partes del mundo en las que se ha detectado la deformación craneal, a analizar las posibles

² Lauremberg P. *Pasicompse nova*. Lipsiae 1634. Citado por Dembo A. y Imbelloni J. 1938. *Deformaciones intencionales del cuerpo humano de carácter étnico*. José Anesi. pág. 234.

³ Delisle F. Contribution a l'étude des déformations artificielles du crâne. Thèse pur le doctorat en médecine; Paris, 1880. Citado por Dembo A. e Imbelloni J. *Deformaciones intencionales del cuerpo humano de carácter étnico*. José Anesi.1938. pág. 234.



razones y, en el caso de Sudamérica, lleva a cabo una revisión detallada y generosa de las noticias de los tiempos en que se redactaron las Crónicas de la Conquista y las interpretaciones que conquistadores, misioneros y visitantes hacen de este fenómeno.

Hay que pensar que en la mayoría de los casos el motivo de la deformación reside en el sentimiento de afinidad, o pertenencia a un determinado grupo tribal o casta (Lucker, 1980, pág. 25-79). En el caso de las deformaciones precolombinas probablemente hayan estado asociadas a la pertenencia a una casta determinada. Se puede decir que ha habido opiniones para todos los gustos; incluso, para algunos autores la razón de la persistencia de la deformación craneal, era el convencimiento de que incrementaba la capacidad intelectual Pardal (XX)⁴, algo realmente sorprendente si se tiene en cuenta la severa alteración del desarrollo craneofacial que estos procedimientos provocan. Realmente curiosa es la opinión recogida, aunque no compartida por Dingwall en su libro (1931, pág. 220) en la que sopesa la posibilidad de que la pronunciada deformación occipital de los cráneos peruanos posiblemente estuviera asociada a una seria inclinación hacia la erotomanía.

Como se hace constar en las monografías de Dingwall (1931) y Dembo e Imbelloni (1938) la relevancia del continente americano en la deformación craneal es incuestionable. En toda América la deformación craneal tuvo una gran relevancia cultural y hay que decir que hay dataciones similares a las citadas anteriormente para el viejo continente⁵. En Sudamérica una de las fuentes de información sobre el tipo de deformaciones, además de la conservación de gran cantidad de restos de individuos con deformación craneal, son las crónicas de los europeos en el momento en que establecen contacto con estos pueblos. Así se suceden varias narraciones que inciden en el tipo de deformación y la casta o tribu a la que pertenecen. Han llegado hasta nosotros relatos en los que se hace referencia al procedimiento empleado (con tablas y lazos) como la narración de Pedro Cieza (1551)⁶. Otros cronistas como de las Casas (1561)⁷ y la crónica de Torquemada

4 Pardal R. La deformación intencional de la cabeza en América. Su estudio desde el punto de vista médico. El cráneo y el cerebro en el tipo tabular erecto de la clasificación de Imbelloni. *Rev. Med. Latinoamericana*. Año XX. 236:817-847. Citado por Dembo A. e Imbelloni J. *Deformaciones intencionales del cuerpo humano de carácter étnico*. José Anesi. 1938. pág. 316.

5 Las deformaciones más antiguas se sitúan en la época precerámica con edades de datación de en torno a los 3.800 años. Cf: Pezzia Assereto A. Un cráneo deformado de Chongos. *Antropología Física Peruana*. Imprenta Ojeda. Ica, 1963. Pág.11. Aunque otros autores, con fundamento dudoso, hablan de deformaciones craneales en Sudamérica de 10.000 años. Cf: Aufderheide y Rodríguez Martín, 2003. pág. 34-36.

6 Cieza de León P. *La Crónica del Perú* (1551). Espasa Calpe S.A. Madrid, 1932. pág. 78. "Cuando la criatura nace, le ponen la cabeza del arte que ellos quieren que la tenga; y así, unas quedan sin colodrillo, y otras de frente sumida, y otros hacen que la tenga muy larga; lo cual hacen cuando son recién nacidos, con unas tabletas y después con sus ligaduras".

7 Casas B. de las. *Historia de las Indias Apologetica II*. (1561) Madrid, 1909. "A cuesta diligencia destas señales para cognoscerse las personas de que provincias eran, parece poder ayuntar la costumbre antigua, de que también tenía cada provincia, de formar las mismas cabezas, porque fuesen cognoscidos los vecinos de cada uno dellos; y así, cuando de infantes, que acababan de nacer y de allí en adelante, mientras que tenían las cabezas muy tiernas, les ataban ciertas vendas o paños con que les amoldaban según la forma que querían tuviesen las cabezas; así unos las deformaban anchas en la frente y angostas en el colodrillo, otras anchas de colodrillo y angostas en la frente; otras altas y empinadas y otras bajas; otras angostas y otras de otras manera; finalmente que las formas de las cabezas tenían muchas invenciones y ninguna provincia, al menos de las principales había que no tuviese forma diferente de las otras cabezas".



(1615)⁸ hacen referencia a la deformación como un elemento diferenciador y de identidad para las distintas tribus. Es de resaltar la crónica del Inca Garcilaso de la Vega (1609), en la que se hace referencia especialmente a los indios Palta⁹: los indios Palta, probablemente con intención gorgónica, deformaban la cabeza para mostrar un aspecto más feroz en la batalla. Es curioso que Garcilaso sólo haga referencia a este tipo de deformación, pues él, al pertenecer a la familia real Inca debería haber tenido conocimiento directo y trato con multitud de personajes del Cuzco pre-contacto que tuvieran deformaciones craneales andinas. Torquemada y de las Casas hablan de deformaciones craneales entre los incas pertenecientes a las castas de la familia del Inca o Capac, con cabezas “algo altas y no mucho” “con forma delgada y empinada en lo alto de ellas” y ambos coinciden con que la forma de la cabeza de los curacas (altos dignatarios del Tahuantinsuyo) era similar a un “mortero de barro” (Weiss, 1961, pág. 108-109). Otras crónicas nos refieren que la deformación, en algunos casos, podría ser signo de sometimiento o dominación de algunas tribus anexionadas por las conquistas del Tahuantinsuyo (Santa Cruz-Pachacutic, 1927, pág. 156)¹⁰. Aunque para otros autores, de nuestros días, estas crónicas del inicio del periodo Colonial tienen poco valor como reflejo de una realidad sociopolítica determinada. La deformación craneal, de hecho, resultó ser algo totalmente incomprensible a la mentalidad de los europeos. Se procedió a prohibirla en los primeros años tras su llegada y formó parte del arrubamiento de costumbres, ritos y estructuras que se produjo como consecuencia del cambio de régimen. En el Perú (costa y montaña) la deformación craneal está presente durante todos los horizontes arqueológicos¹¹ de forma más o menos extensa. Se mantiene durante el periodo inca y los primeros años de la conquista para ser abolida definitivamente por los Concilios Limeños de 1576 y 1582 (Fray Jerónimo de Loayza, 1614)¹². La estructura estable, las buenas comunicaciones, la burocracia eficiente del imperio incaico facilitaron sobremanera el proceso de dominación y de cambio administrativo del imperio. Aunque el sistema estructural y de cas-

8 Torquemada J. de. *Libro catorce de la monarquía indiana*. Tomo 2. pág. 583. Citado por Weiss P. *Osteología Cultural. Prácticas cefálicas*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, 1961. Tomo II. pág. 108 “...porque la mayor parte así en cada provincia tienen propia costumbre y diversa de las otras de deformar con industria las cabezas”.

9 “Esta nación -los Palta- tenía como distintivo cabeza entablillada. A los recién nacidos de les ponía una tablilla en la frente y otra en la parte posterior de la cabeza, amarrándola fuertemente entre sí; cada día se ajustaban más las tablillas, acercándola una a otra, mientras que al niño se le obligaba a estar echado boca arriba y las tablillas no se quitaban hasta después de los tres años cumplidos y así salían las cabezas muy feas” Vega Inca G. de la. *Comentarios Reales*. (1609). Espasa Calpe S.A. Madrid, 2003. Libro 8. Capítulo V.

10 Santa Cruz-Pachacutic J. de. *Historia de los Incas. Relación de su gobierno* (1613). Librería San Martí. Lima 1927. pág. 156. Referente a los hechos de Apo Capac, primero de la estirpe los Inca. “Este mismo Inca les había mandado que atasen las cabezas de las criaturas para que sean simples y sin ánimo, porque como los indios de gran cabeza y redonda suelen ser atrevidos, para cualquier cosa son inobedientes (...) y también había mandado que todas las naciones a el sujetas les atasen las cabezas a las criaturas para que fuesen largas y quebradas en la frente y fuesen obedientes”.

11 Periodos de desarrollo histórico del Perú, véase introducción histórica.

12 Fray Jerónimo de Loayza: “...que la superstición de amoldar las cabezas de los muchachos de ciertas formas que los indios llaman Zayto uma y Palta uma, del todo se quiten”. *Concilio de Lima*. Parte 2. Resolución 101. (1614). Citado por Lastres J.B. *Historia de la medicina peruana. I La medicina incaica*. En: Eguiguren LA. Editor. *Historia de la Universidad*. Vol V. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, 1951. pág.76-85.



tas cerradas se mantuvo en gran medida, sustituyendo parcialmente o en su totalidad los recién llegados a las clases dominantes, la ordenación teocrática del Tahuantinsuyo fue sabiamente utilizada por la corona española, y si bien es cierto que la barbarie y la intolerancia de los recién llegados destruyó gran parte del legado cultural precolombino, muchas estructuras, costumbres y ritos lograron mantenerse agazapados, camuflados bajo una nueva cobertura frecuentemente religiosa, o bien fueron “reutilizados” por las nuevas tendencias culturales. Es fácil constatar que muchos aspectos del rico mundo cultural precolombino han logrado llegar hasta nosotros tras la aparición de estructuras coloniales, y que es éste el elemento cultural más relevante en Sudamérica (Restall, 2004 capt. 6 y 7. pág. 151-189). Es cierto que tras unos años las costumbre de las cabezas deformadas, posiblemente ligados a muchos rituales del nacimiento y de la infancia quedaron olvidados en aquellas zonas con importante presencia española, solo se mantuvieron en aquellas zonas alejadas de la presencia de los europeos, como la profundidad de la selva amazónica, donde han persistido, como refieren Weiss (1961) y Cabieses (1974), hasta nuestros días ¹³.

El objetivo del presente trabajo no es entrar en la polémica antropológica de si determinado tipo de deformación es exclusivo de un determinado clan o de una determinada clase social; tampoco es especialmente determinante el que los cráneos empleados en este trabajo pertenezcan de manera totalmente segura a una determinada cultura y a una determinada época. En realidad, lo relevante es que la deformación esté perfectamente definida en ese cráneo y que su pertenencia al grupo morfológico (tipo de deformación) sea clara. Aunque hay aspectos, como se ha enunciado, en la deformación craneal que permanecen poco claros no son determinantes en la calidad de los resultados de esta investigación. Lo que se procederá a estudiar en el presente trabajo es una tipología determinada de cráneos deformados y los caracteres estructurales de su aparato masticatorio.

Haremos ahora una breve reseña sobre los diferentes tipos de deformaciones craneales practicadas entre los antiguos peruanos.

Como se ha visto anteriormente la nueva forma de la morfología craneal se obtenía tras el empleo de determinados vendajes o tablas que deformaban la cabeza del recién nacido y que modificaban la aposición de hueso en las suturas del cráneo del niño a medida que se iba desarrollando el sistema nervioso central (SNC). También el crecimiento de las diferentes unidades

13 Weiss P. *Osteología Cultural. Prácticas cefálicas*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, 1961. Tomo II. Así lo atestigua con varias ilustraciones de deformaciones craneanas en indios amazónicos del siglo XX. Lámina IX pág. 47. También Cabieses F. en su Tomo I de *Dioses y Enfermedades. La medicina en el antiguo Perú*. Artegraf. Lima, 1974. (Ilustración pág. 142).



funcionales de los sentidos y estructuras funcionales alojadas en el viscerocráneo, ejercía su labor complementaria. La deformación de la bóveda craneal en el recién nacido es fácil de conseguir pues la bóveda craneal tiene, en este momento, una gran plasticidad. Las placas de osificación que pueden ser sometidas a deformación plástica están unidas por bandas de tejido fibroso denso y cartílago que permiten su articulación en el momento del paso por el canal del parto. Las fontanelas permiten el acabalgamiento de los huesos adyacentes. Incluso el occipital puede plegarse en la unión entre la porción petrosa (que rodea al *foramen magnum*) y la porción escamosa para un mejor avance por el canal pélvico (charnela de Budín) (Moloy, 1942). Queda tan solo la estructura del basicráneo como un elemento dotado de cierta rigidez que protege, a las estructuras que quedan en él alojadas o bien cubiertas por él (órbita y oído interno; salida de pares craneales y entrada de vasos en cavidad craneal). Estas características son las empleadas en el momento en que se procede a vendar y “modelar” la cabeza del neonato, a fin de obtener una determinada deformación, como describen las Crónicas del tiempo de la llegada de los europeos.

2.2 TIPOLOGÍA DE LAS DEFORMACIONES Y ELEMENTOS DEFORMADORES

Tanto el libro de Dingwall (1931) como el de Weiss (1961) dedican pormenorizados apartados a la descripción de los aparatos deformadores. Dingwall de una manera más general, Weiss dedica capítulos a la descripción de los componentes de los aparatos deformadores. Los aparatos empleados para provocar la modificación craneal han sido en general de dos tipos: sogas y almohadillas, conocidos estos en lengua quechua como *llautu*, y la deformación por medio de sogas y tablas en la cual podemos incluir aquellos cráneos que han sido deformados por haber sido fijada la cabeza a la cuna por medio de bandas y cuerdas. Es realmente interesante y pormenorizado el estudio que sobre estos diferentes aparatos deformadores llevó a cabo Weiss¹⁴. En base a los trabajos de este autor sobre los fardos de momias desenterrados por J.C. Tello, y siguiendo su descripción, podemos afirmar que debieron de emplearse diferentes tipos de elementos deformadores, así lo ha podido él constatar en los fardos de neonatos e infantes procedentes de los enterramientos estudiados. Weiss opina que con el mismo aparato o con una variedad estrecha de aparatos, empleados en una sucesión diferente, se pueden conseguir deformaciones totalmente dispares. Es decir no hay una relación unívoca entre un aparato determinado y una determinada forma de cabeza (Weiss, 1961, pág. 11-13). Tanto Weiss como Imbelloni intentaron llevar a cabo una clasificación de los cráneos deformados por su pertenencia a diferentes cultu-

¹⁴ Haremos repetida referencia a la obra de Weiss P. *Osteología Cultural. Prácticas Cefálicas*. (1958,1961) que al estar redactada en castellano y tener una tirada muy reducida ha hecho que además de ser una auténtica joya bibliográfica no haya tenido prácticamente difusión en el ámbito internacional. Es realmente llamativo que la mayoría de los autores anglosajones desconocen la existencia de su monografía y, en concreto, la del Tomo II. Cf. Aufderheide y Rodríguez Martín, 2003. pág. 34-36.

ras, y se encontraron con que en realidad aparecen, en algunas ocasiones, formas intermedias que son de difícil filiación, pero que afortunadamente son una minoría.

La base de la clasificación de deformación craneal llevada a cabo por Dembo e Imbelloni (1933), parte de la base de que cada tipo de deformación craneana intencional es el producto de un aparato deformador bien definido. De este modo, distingue tres tipos de deformación. Un tipo anular producido por vendas y dos tipos de tabulares producidos por presiones de superficies rígidas contra la bóveda: tabular oblicuo, por medio de tablillas libres y tabular erecto por medio de cunas. Entre éstos no existirían formas intermedias, por lo cual su diagnóstico no ofrece dudas (Munizaga, 1987). Los anulares se distinguen de los tabulares por la forma que adquiere la sección de la bóveda perpendicular al eje de la forma: circular, la primera, y ovoide de diámetro mayor transversal, la segunda (Munizaga, 1987).

La clasificación de deformaciones craneales peruanas, llevada a cabo por Weiss, emplea también como elemento relevante al apano deformador; con todos los condicionantes que se han expuesto anteriormente y que condicionan la pureza del método empleado. Es sencilla pero muy útil dada su fácil comprensión y su capacidad para diferenciar las presuntas deformaciones costeñas de las deformaciones realizadas por las culturas serranas o andinas.

De este modo se encuentran deformaciones producidas por cuna, que son todas ellas típicamente costeñas, y que son el grupo mejor definido y más regular. Un segundo grupo con deformaciones producidas por almohadillas y sogas, conocido como *llautu*, es éste un grupo mucho más heterogéneo pues el *llautu* puede variar bastante, dependiendo de la etnia que lo esté empleando. Un tercer grupo en el que el aparato empleado es mucho más complejo y la deformación de la bóveda alcanza morfologías más caprichosas¹⁵.

Nos centraremos, a continuación en la descripción de las más relevantes para este trabajo.

2.3 CULTURAS COSTEÑAS CON DEFORMACIÓN ANTERO-POSTERIOR

Las culturas costeñas se caracterizan por la deformación obtenida a partir de cunas o elementos de ligazón fijados a las cunas. Es un tipo de deformación que se caracteriza por su regularidad en el resultado pero también por su asimetría, la asimetría se explica porque los niños eran girados en la cuna para ser amamantados, de este modo, frecuentemente una de las hemi-bó-

¹⁵ Esta clasificación, es la que sigue en líneas generales Weiss P. *Osteología Cultural. Prácticas cefálicas*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, 1961. Tomo II. , pero la idea de la clasificación en dos grupos ya había sido propuesta por Hrdlicka que redujo las deformaciones a dos grupos: anteroposteriores y circunferenciales. Cf: Hrdlicka A. Artificial deformations of the human skull with special reference to America. En: *Actas del XVII Congreso Internacional de Americanistas*. Lehmann-Nistche R. International Society of Americanists. Buenos Aires, 1912. pág. 147-9.



TABLA 2.1 TIPOS DE DEFORMACIÓN (Weiss P., 1962).		
CUÑA	BANDAS O LIAS (LLAUTU)	APEROS ESPECIALES

TIPOS DE DEFORMACIÓN (Weiss P., 1962).		
<p style="text-align: center;">CUÑA</p> <p>Cráneos con tendencia a la asimetría (plagiocefalia), por la irregularidad y diferencia del aplanamiento particularmente del frontal. No presentan cintura supra mastoidea, formas bilobuladas ni concavidad de la línea vertical del frontal. Algunos presentan un surco coronal como se hubiesen suportado a ese nivel la presión de una cuerda (Weiss, 2014; pág161).</p>	<p>FRONTO OCCIPITAL COSTEÑO</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Cabeza braquioide, baja irregular a menudo torcida. · Común en la costa norte y centro en todas las época. · Única en los cementerios sin cerámica (Asia y Culebras) se entrefera entre otras con los tipos Palta, Huara, Chavin cavernas y Aimara en épocas posteriores. · de la 1ª época- pre-cerámico sitios arqueologicos de Asia y Culebras. · De la 2ª época resurgimiento de las culturas locales del litoral. Aparece mezclado con otros tipos y asociado a la trepanación supra-iniana, eventualmente con manchas verdes en la cara.
	<p>OCCIPITAL, COSTEÑO-INCA O COSTEÑO</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Modalidad occipital y la menos pronunciada de las deformaciones peruanas. · Difundido en el litoral con la denominación Inca. · Casi exclusivo en la época próxima a la conquista. · Aplanamiento occipital y occipito-parietal la frente en los ejemplos típicos es normal. · Presenta con más frecuencia que otras manchas verdes en la cara y eventualmente la trepanación supra-iniana.

vedas está más deformada que la contralateral¹⁶. Esta deformación se caracteriza por una com-

¹⁶ La rotación de la cabeza del lactante para lactar está demostrada en pequeñas figuritas cerámicas de las culturas costeñas (Chimú y Mochica) que presentan a la madre en el momento de amamantar al niño, estando el niño fijado a la cuna (*quirao*). En opinión de Cabieses (citando a Garcilaso) estos aparatos cumplían la función de que el niño no se acostumbrara a estar en brazos de su madre, la madre se aproximaba al niño pero no lo tocaba ni lo sustentaba en el regazo. Cf. Cabieses F. *Dioses y Enfermedades. La medicina en el antiguo Perú*. Artegraf. Lima, 1974. Tomo I. pág. 130-140.

TIPOS DE DEFORMACIÓN (Weiss P., 1962).

<p>BANDAS O LIAS (LLAUTU)</p>	<p>I-SUB.-GRUPO ANDINO</p> <p>Solo deformado por bandas (<i>llautu</i>) (incluye las formas anulares) reúne las formas forjadas por <i>llautu</i> sin otros aditamentos que alteren sustancialmente la presión directa de las bandas</p>	<p>1.1-TIPO AIMARA</p> <ul style="list-style-type: none"> · Deformación andina, común y con muchas variantes. Hay dos variantes: la variante puntiaguda y la tilcara menos común, pueden corresponder a la cabeza empinada de los nobles Incas. · Sugiere la cabeza de pan de azúcar o de mortero mencionado por los cronistas. <p>1.2-TIPO OPA</p> <ul style="list-style-type: none"> · Forma poco común, cilíndrica. · Deformación andina por banda (<i>llautu</i>). · Molde oblicuo parieto-occipital con la frente normal. · Se explica por una banda como gorra tolosana a podido ser divisa de dignidades o castas. <p>1.3 -TIPO PAMPAS</p> <ul style="list-style-type: none"> · Forma rara, muy pronunciada. · Pudo ser divisa de dignidades o castas. · Es el molde anular del tipo Natchez. · Deformación andina por banda (<i>llautu</i>) de cinta ancha. · Forma erecta cilíndrica.
<p>Formas regulares, de diámetro, horizontales constreñidos, cintura supramastoidea, asimetrías raras y poco marcadas.</p>	<p>II-SUB.-GRUPO PARACAS-NAZCA</p> <p>Deformaciones por bandas (<i>llautu</i>) con roscas o almohadillas de algodón. (incluye formas tabulares y pseudo-tabulares de Imbelloni).</p> <p>Reune las formas producidas por <i>llautu</i> sobre roscas, almohadillas o otras superficies capaces de plasmar aplanamientos regionales, sean posteriores, anteriores o anteroposteriores.</p> <p>Desde el punto de vista de la deformación cefálica Paracas y Nazca son dos colectividades costeras que utilizaban sistemas deformadores andinos (Weiss,2014; pág.207).</p>	<p>2.1-TIPO CAVERNAS</p> <ul style="list-style-type: none"> · Se encontra en algunos grupos Chavin y con material cavernas. · Cabeza en cuña. · Es fronto-occipital, con frente corrida y la parte posterior achatada, en toda su extensión o solo por encima de la protuberancia occipital. · Forma arcaica, explicable hasta por tres sistemas conocidos por la arqueología y que son la cuña deformadora acortada como un apero cefálico, la banda (<i>llautu</i>) con roscas de algodón y la cinta deformadora. <p>2.2-TIPO NECRÓPOLIS</p> <ul style="list-style-type: none"> · Molde por banda (<i>llautu</i>) del sub.-grupo Paracas-Nazca, más constreñido en el sentido antero-posterior. · Presenta variantes erecta y oblicua y con la frente cóncava. · En el cráneo base del moldeado de la figura: la deformación afecta los huesos propios de la nariz, el conducto auditivo y la orientación del agujero occipital. <p>2.3- TIPO CABEZA LARGA</p> <ul style="list-style-type: none"> · Es el molde Aimara con la parte posterior aplanada. · Las trepanaciones de Paracas se asocian preferentemente a este tipo · Como el Aimara tiene una variedad puntiaguda. · Algunas variantes se confunden con el Natchez. <p>2.4-TIPO NATCHEZ</p> <ul style="list-style-type: none"> · Forma vertical igual al tipo Pampas con la parte posterior aplanada. · El mayor número de formas increíbles pertenecen a este tipo. · Suele tener surco retro bregmático y cintura supra-mastoidea visible. · Sus variantes se confunden con las de cavernas y cabeza larga. · Formas típicas presentan los personajes de los fardos funerarios, necrópolis. <p>2.5-TIPO NAZCA</p> <ul style="list-style-type: none"> · La frente plana es un carácter constante de este tipo, explicable por la almohadilla frontal nazca conocida por la arqueología. · Personajes fabulosos de la cerámica nazca ostentan un disco que hace resaltar la forma plana de la frente.



TIPOS DE DEFORMACIÓN (Weiss P., 1962).		
APEROS ESPECIALES	TIPO HUARA	<ul style="list-style-type: none"> · Cabeza achatada de arriba abajo, en algunos casos bilocada con grandes prominencias parieto-occipitales. · Frente huidiza, se encuentra con el tiahuanaco de la costa. · La actitud erguida depende como en el necrópolis de la desviación del plano del agujero occipital.
	TIPO PALTA	<ul style="list-style-type: none"> · Forma simétrica, bilobar, la más aplanada en sentido antero-posterior. · Se encuentra mezclado con las formas costeñas por cuña, sin que sea fácil su identificación. · El nombre se relaciona con las “cabezas anchas de un lado al otro y angostas de la frente al colodrillo” que menciona Garcilaso como distintivo de los indios Palta y Manta.

presión antero-posterior de la bóveda craneal, es una de las deformaciones que se estudiarán en este trabajo y es la que presenta menor alteración o diversificación dependiendo de la variedad

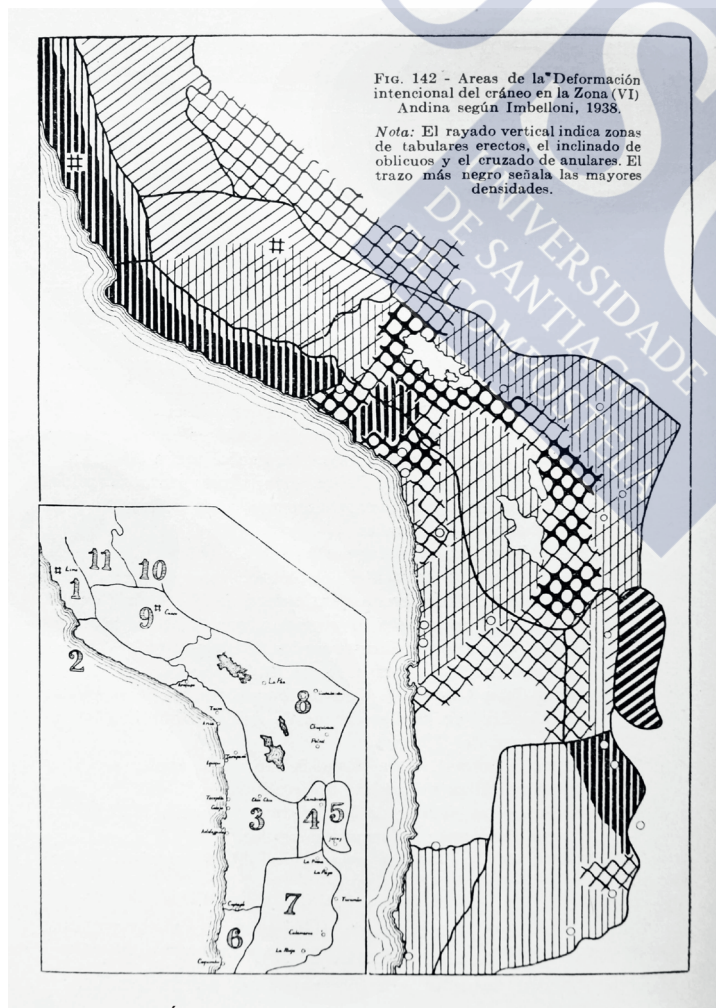


Fig. 2.2 - Áreas de la deformación. Dembo y Imbelloni, 1938.

tribal. Para Weiss, que lleva a cabo una clasificación morfológico-cultural, está subdividida en dos grupos: un grupo denominado Fronto-Occipital Costeño que tiene dos periodos, una primera época, muy primitiva, precerámica, de los yacimientos de F. Engel de Asia y Culebras, en la que los restos aparecen sin objetos cerámicos en su entorno, y una segunda época, más reciente, que se asocia a la aparición de cráneos con trepanación suprainiana. Este grupo se caracteriza por la compresión anteroposterior con deformación tabular del frontal y del occipital. Si bien es verdad que la deformación frontal nunca es tan aparente como la del occipital pues el asentamiento de la cabeza en la cuna, frecuentemente el polo frontal con elementos no tabu-

lares, prefiriendo el empleo de bandas o sogas de tela o de tejido trenzado tensadas y atadas a los extremos de las cunas (denominadas en quechua *quirau*). El segundo grupo de deformación costeña es el formado por el Tipo Occipital Costeño Inca Costeño. Es este un tipo de deformación que se extiende por el litoral hasta la época preincaica tardía y la dominación incaica, suele presentar manchas verdosas en la cara por la presencia de metales (cobre) en el interior de la boca o sobre la mandíbula y el maxilar.

Este tipo de deformaciones propias de la costa del Perú son similares a las formas Tabulares



Fig. 2.3- Deformación craneal en Norteamérica y cuna deformadora según Paul Kane. Montreal, Museo de Arte.

Erectas descritas de Dembo y Imbelloni (1938, pág. 257-277). Las alteraciones de la bóveda craneal se obtienen tras la aplicación, como hemos visto, de cunas preparadas con un sistema de tracción del frontal dotadas de una almohada mullida para evitar excesiva presión en la región occipital. Este tipo de cunas son totalmente diferentes a las empleadas por los indios norteamericanos, descritas por Dingwall (1931). Eran estas cunas de transporte, que se ataban a la espalda de las madres y eran empleadas para transportar al niño. Probablemente el origen de la deformación por cuna sea la necesidad de la madre de desempeñar continuas labores agrícolas y domésticas y poder amamantar al hijo (Ca-

bieses, 1974, pág. 130-140 ; Vega Inca G de la., 1943, pág. 165), las cunas costeñas peruanas son sencillas y poco sofisticadas contrastan con las muy elaboradas cunas de transporte apaches y chinook (Dembo e Imbelloni, 1938, pág. 294-299). Como ya hemos dicho la plagiocefalia es frecuente entre estos cráneos (60%) (Weiss 1961, pág. 52). Es muy importante, como carácter diferenciador de otro tipo de deformaciones que estas deformaciones no presentan nunca ni cintura supramastoidea ni surco retrobregmático pues no se aplican directamente las cuerdas

ni las vendas al cráneo. Una cuestión que es conveniente abordar en este momento es la falta de coincidencia en sentido estricto que hay entre la clasificación de deformaciones antero-posterior de Imbelloni (1938) y la clasificación propuesta por Weiss. Imbelloni, hace una clasificación dependiendo de la posición de la escama del occipital y basándose en el trazado de un polígono entre los puntos craneométricos de la bóveda. La compresión fronto-occipital, para este autor, siempre se obtiene a partir de deformador tabular, siendo denominados, por tanto por él como “tabulares”. Estas deformaciones se dividen de acuerdo con el ángulo formado por el eje dominante de la bóveda con respecto a la base craneal, en erectos o en oblicuos. Esta es una clasificación que no nos resulta satisfactoria pues hay cráneos con compresión fronto-occipital que han sido obtenidos con aparatos de deformación tipo *llautu* o *llautu* con una tábula occipital (Weiss, 1961). Es especialmente interesante a este respecto el estudio sobre una representación cerámica, hecha por Tello (1931), en la que hay dos niños que presentan un aparato deformador con compresión antero-posterior mixto en el que se observa un escudete frontal con almohadillado y sogas de trincado fronto-occipital, probablemente como bien afirma el autor el apero deformador también cumpliría una función ornamental. Weiss describe y presenta fotografías de fardos de niños desenterrados con este tipo de aparato deformador. Uno de los tipos de deformación incluidos en este trabajo será la deformación antero-posterior o también denominada fronto-occipital. Se caracteriza por el aplanamiento de la parte posterior, occipito-parietal, con cierta persistencia de morfología normal en el resto de la bóveda, la frente suele ser normal o con cierto aplanamiento, en este caso se clasificaría en el tipo de fronto-occipital costeña de Weiss. La afectación de la frente en mayor o menor medida es un dato que tiene mayor relevancia cultural que anatómica, pues la deformación craneal general es muy parecida. Las deformaciones antero-posteriores incluídas en el presente trabajo son erectas y no oblicuas.

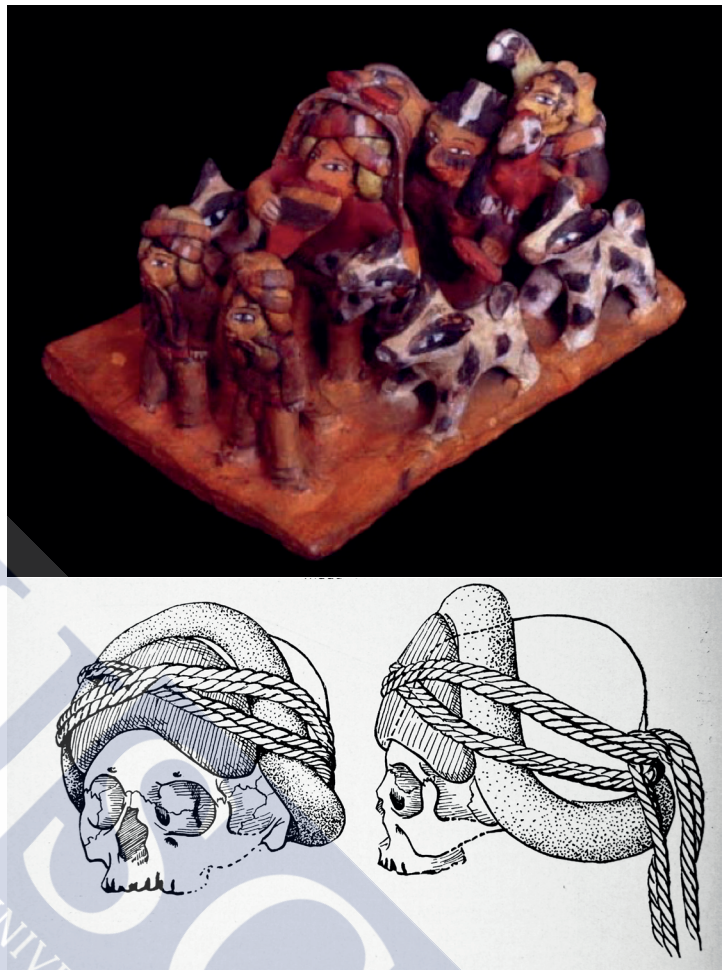


Fig. 2.4- Aparato deformador para compresión antero-posterior según Weiss (1961). Arriba ceramio descrito por J.C. Tello, con ese aparato deformador.

1.- El Subgrupo Andino o Anular, que es el resultado de la aplicación de un *llautu* constituido solo por bandas, no suele tener aditamentos relevantes.

2.- El Subgrupo Paracas-Nazca, que a diferencia del anterior tiene una localización costeña. Es el otro grupo deformado relevante en el presente trabajo. La deformación se consigue a partir de un *llautu* que se aplica sobre almohadillas y roscas (almohadillas en forma de corona), estas almohadillas, rellenas de fibra vegetal o de pelo de animal firmemente prensado y forrado de varias capas de telas de urdimbre compacta, suelen ser muy rígidas, parecidas a las tablillas de la deformación fronto-occipital. Las formas de este subgrupo se pueden obtener con una aplicación de un *sutcko* (cinta con banda y complicado sistema de sogas deformadoras) descrito por Weiss (1961). El resultado deformador puede ser muy variado, dependiendo de la zona de la banda en la que se realice mayor tensión.

En el Subgrupo Andino se diferencian los tipos: Aimara, Pampas y Opa. El Tipo Aimara es el también conocido en los estudios de Tello como Anular, descrito inicialmente por Hrdlička (1922)¹⁸, es la forma andina más conocida y más extendida. Su presencia en las necrópolis costeñas parece deberse a movimientos migratorios. La posición de la bóveda es de carácter intermedio con eje de bóveda en un posición oblicua de abajo-arriba y de adelante-atrás. Entre la posición más vertical del Tipo Pampas y la forma más horizontal hacia dorsal del Tipo Opa. Los frontales son amplios y aplanados pues el asentamiento sobre frontal y occipital suele hacerse con estructuras rígidas. Tiene diferentes variedades, la forma puntiaguda y la forma vertical que puede presentar frecuentemente la conocida como variante Tilcara que presenta una concavidad en el perfil frontal (Weiss, 1961, pág. 64 ; Dembo e Imbelloni, 1938, pág. 278). El Tipo Opa, Weiss lo considera una tipología Anular o Circunferencial con formación de un casquete occipital producido por un vendaje preciso en esa zona, similar a los vendajes empleados en la zona de Toulouse en el siglo XIX. Es una tipología en la que se produce una gran horizontalización del eje de la bóveda, esto provoca que la observación del cráneo desde su norma vertical haga que parezca excesivamente dolicocefálico. Este tipo de cráneo es considerado por otros autores como una variedad de la anular oblicua (Dembo e Imbelloni, 1938). El nombre de este tipo de deformación viene del epónimo de los indios de la zona en la que se halló el mayor número de estos cráneos (Weiss, 1961, pág. 24-51). “Opa” en quechua significa “tonto”; nunca se sabrá si el tipo de deformación tenía algo que ver con la fama de condición intelectual de los deformados. También “upa” en quechua significa sordo, y entre estos cráneos se ha descrito un número abultado de osteomas del conducto auditivo externo. Weiss considera esta posibilidad como la más factible, pues dada la escasez de cráneos de este tipo se inclina por pensar en que esta deformación sea típico de un oficio. No se han hallado cráneos de este tipo en la costa, se considera una variedad propia y exclusiva del interior.

18 Hrdlička A. Aymara deformation in America. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1922; 5:400.



El Tipo Pampas es una versión andina del Natchez que se explica por un *llautu* formado por una cinta ancha de tipo cilíndrico. Presenta una forma alta cilíndrica, prismática: en el perfil las líneas del frontal y occipital son rectas y casi paralelas.

El Subgrupo Paracas-Nazca es, en realidad una variedad de las formas descritas anteriormente, mejor que variedad se le podría considerar como una elaboración. Proviene de la clasificación de Weiss que al ser discípulo de Tello, decidió dotar de independencia a algunas de las formas circunferenciales que presentaban rasgos propios. En este subgrupo se diferencian varias tipologías todas ellas asociadas a etnias bien definidas y conocidas por sus especificidades culturales:

Los Tipos Cavernas y Necrópolis, provenientes de las excavaciones de Tello en Paracas. El tipo Cavernas es determinado por Tello como deformación antero-posterior. Proviene todos ellos de Cerro Colorado en la zona de Paracas, sus necrópolis colectivas son la fuente de estos cráneos. Algunas de las formas del tipo Cavernas son muy similares a los descritos como deformados antero-posteriores de la costa, son similares pero presentan una cabeza más en forma de pico de flauta. La deformación de la bóveda no es tan regular como en el fronto-occipital costeño pues la deformación de la glabella es muy frecuente. Entre los cráneos de Cavernas se describe también la variedad de cráneos bilobados y también hay un tipo turricefalo similar al Natchez, en realidad no parece una clasificación morfológica muy bien definida, es más bien una clasificación étnico-cultural.

El Tipo Necrópolis, es una variedad de deformación circunferencial oblicua en la que la bóveda adquiere la forma de una cabeza alta turricefala con diámetro transversal lateral extremadamente amplio y antero-posterior muy estrecho. Es una situación límite de la deformación anteroposterior por cuna, es frecuente la escotadura frontal y la disposición oblicua de la bóveda craneal. La diferencia con el Tipo Cavernas es la forma más redondeada de la bóveda.

Hay otras variedades de formas caprichosas como el Tipo Cabeza Larga que parte de una deformación Aimara a la que se somete a un aplanamiento extremo de la superficie occipital. Las formas asimilables al Tipo Natchez que integran varias formas turricefalas “increíbles” así descritas en primer lugar por Virchow (1892)¹⁹. El Tipo Nazca, asociado a esta cultura y reproducido en múltiples objetos cerámicos. Y, finalmente aquellas formas de deformación extrema no obtenibles a partir de *llautu* o de cunas y tablillas: el Tipo Huara, asociado a esta cultura y el tipo Palta, bilobado, monstruoso, reproducido también en objetos cerámicos y el único recogido por Garcilaso, pues en realidad, es de los más notables si no lo es el más llamativo²⁰.

19 Virchow R. *Crania Ethnica Americana. Sammlung auserles ener amerikanischer Shädeltypen*. Verlag von A. Asher et al., 1892. Citado por Dembo A. y Imbelloni J. *Deformaciones intencionales del cuerpo humano de carácter étnico*. José Anesi. 1938.

20 Comenta el Inca Garcilaso en su crónica que los indios Palta para hacer más llamativa la deformación (bilobar) del cráneo se afeitaban los cabellos de la banda central y alborotaban y encrespaban los cabellos de ambos lados. Vega Inca G. de la.



Finalmente es conveniente apuntar una pequeña anotación sobre los aparatos deformadores descritos por Weiss. Weiss en su monografía no cita ningún elemento deformador con máscara facial, recientemente otros autores han descrito una variedad de aparato deformador que está dotado de una máscara facial que hace presión sobre los huesos malaros (Allison *et al.*,1981). También Dingwall (1931), cita a los Amahuaca (en la zona Andina) que según Farabee emplearían vendajes que afectaría también la zona nasal. La presencia de estos deformadores nasales podría complicar la interpretación de las alteraciones maxilares en los cráneos deformados.

Un aspecto que, aunque se vuelva a tratar más adelante al argumentar los resultados del presente trabajo, es conveniente ahora dejar bosquejado es el que se refiere al momento y duración de la aplicación del aparato deformador. Hay que decir que hay referencias en las crónicas al respecto y la mayoría de ellas coincidentes. Los cronistas coinciden al narrar que los aparatos deformadores se colocaban al recién nacido y se mantenían por un periodo de varios años, la



Fig. 2.6- Deformaciones extremas. Tipo Huara. Modificado de Weiss, 1961; Tello y Xesspe, 1979.

mayoría coinciden en afirmar que el aparato era aplicado durante 4-5 años²¹. Bien es verdad que Dingwall (1931), habla de aplicaciones de deformadores durante solo 6 meses. Referente a lo que hoy en día se conoce sobre la estabilidad del crecimiento craneofacial parece más lógico pensar en un periodo de varios años que en periodos de meses, para de este modo conseguir una verdadera modificación del vector de crecimiento (Delaire y Billet, 1964). Sin embargo, otros autores que han estudiado cráneos deformados en Oceanía y en Norteamérica sostienen que el

Comentarios Reales. Tomo II. Emecé Editores S.A. Buenos Aires, 1943. pág. 165-234.

21 Son relevantes a este respecto las crónicas de Fray Bartolomé de las Casas, del Inca Garcilaso y de Pedro de Cieza. Cf. Weiss P. *Osteología Cultural. Prácticas cefálicas*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, 1961. Tomo II.

aparato deformador se instalaba solo durante unas semanas o a lo sumo seis meses²².



²² A propósito de cráneos hawaianos Cf: Schendel S.A. Walter G., Kamisugi A. Hawaiian craniofacial morphometrics: Average Mokapuan skull, artificial cranial deformation, and the “rocker” mandible. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1980; 52 (4):491-500.







3. APUNTE GEOGRÁFICO-CULTURAL SOBRE LOS CRÁNEOS EMPLEADOS





3.1 PARACAS

Este enclave arqueológico, en la zona sur del Perú, se encuentra entre 12 ° 50' y 15 ° 50' de latitud Sur y 75 ° y 76 ° 50' de longitud oeste. Situado al sur del Departamento de Lima, más o menos en los límites actuales del Departamento de Ica, se extiende a lo largo de 21.327 km². Este territorio está encajado entre el océano Pacífico al oeste y al este el Departamento de Ayacucho, y se presenta como una región con un clima subtropical seco y desértico. Su descripción desde norte a sur incluye la Quebrada de Topará, los valles de Chíncha y Pisco, la península de Paracas, Valle de Ica, los valles de la cuenca del Río Grande de Nazca y los valles de Acarí, Yauca y Chala. Estos valles fértiles se separan unos de otros por zonas desérticas áridas (Pampas). Aunque presenta cierto grado de uniformidad, esta región se caracteriza por variaciones ecológicas locales que dependen del flujo hidráulico de los ríos, de las altitudes y de las distancias al océano Pacífico y a la cordillera de los Andes (Tinteroff, 2008).

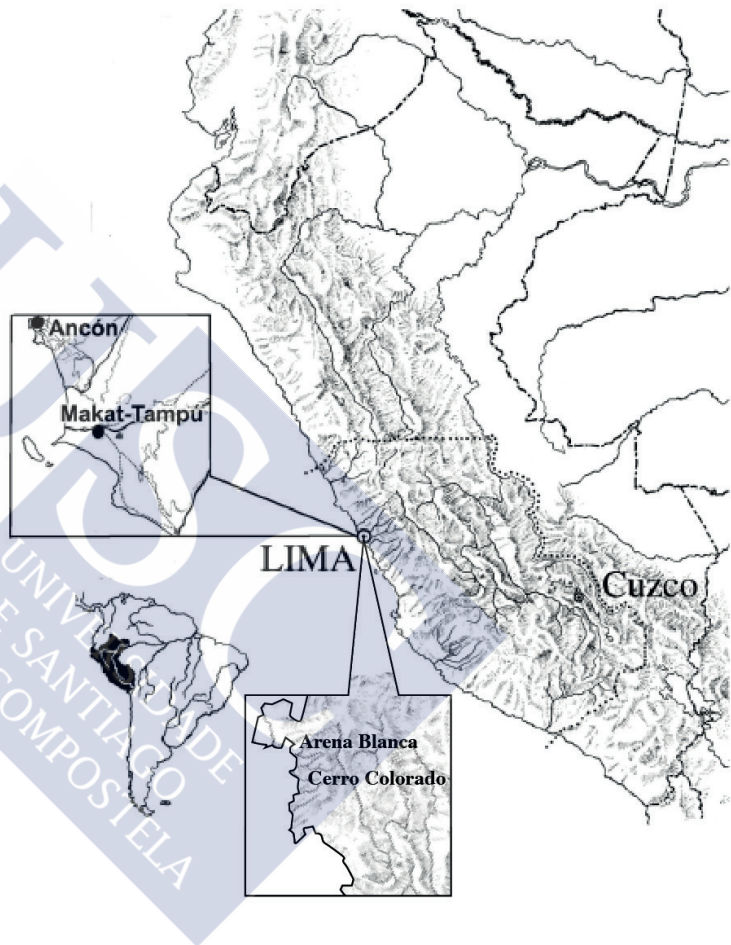


Fig. 3.1- Mapa del Perú, donde se observa la localización geográfica y las áreas arqueológicas, de donde provienen los cráneos estudiados.

Con la excepción del Valle de Ica orientado de norte a sur, todos los valles de la costa sur son transversales extendiéndose desde la vertiente occidental de la cordillera de los Andes hacia el este hasta el océano Pacífico a oeste. Esta configuración geográfica ofrece al territorio de la costa sur conexiones inter y extra regionales entre la parte norte y sur del litoral (a través del Valle de Ica) y entre la zona costera y la zona montañosa hacia al este. Estos hábitats, los centros y sitios ceremoniales y funerarios Paracas y Nazca se encuentran a lo largo y cerca de los valles



a altitudes entre 0 y 1000 metros, donde las tierras fértiles permiten la explotación agrícola (Reindel y Isla, 2006; Tinteroff, 2008).

El paisaje de la costa sur del Perú está configurado por tres grandes zonas geográficas: los valles fértiles donde prospera la agricultura y en donde se asentaron las poblaciones; las áreas intermedias desérticas hostiles a la ocupación permanente y el litoral esencialmente explotado por sus recursos marítimos (Tinteroff, 2008).

Paracas, originalmente nombre de una Península situada en la costa central peruana, al Sur de Lima, en la provincia de Pisco (Tello y Xesspe, 1979), departamento de Ica, es la zona donde se hallaron los mundialmente famosos tejidos llamados “mantos de Paracas”, en la década de los 20 del pasado siglo (Doig, 1970).

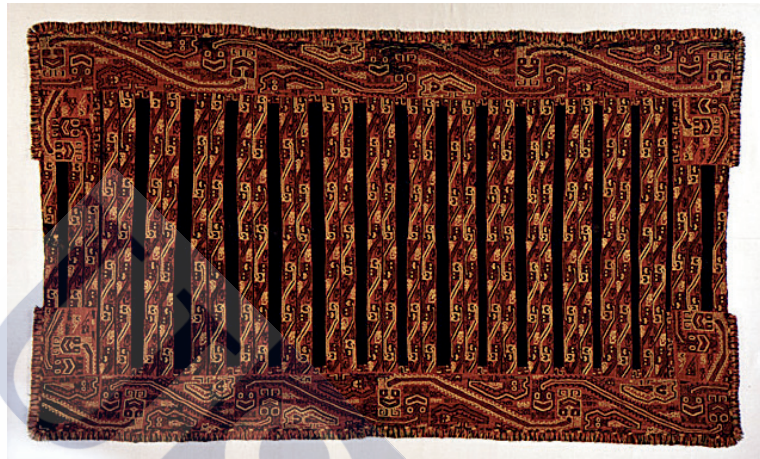


Fig. 3.2- Manto. Perú, Costa Sur, Paracas, 200 a.C.
Museo de Arte del Condado de Los Ángeles

Desde el punto de vista orográfico, la península de Paracas tiene dos partes: una, que pertenece a la península propiamente dicha, formada por varios cerros; y otra, que corresponde a la garganta y llanura arenosa que se conecta con el continente o región de Pisco (Tello y Xesspe, 1979).

Paracas es una cultura costera del sur de Perú que se desarrolló entre el 800 a 200 a.C. y que incorporó influencias del estilo Chavin en sus manifestaciones culturales (Reindel y Schaich, 2013). Se la emplaza dentro del llamado Horizonte Temprano (Tomasto, 2009). En términos arqueológicos, Paracas puede referirse como una cultura (en realidad dos culturas: Paracas Cavernas seguido por Paracas Necrópolis), un estilo textil (otra vez con dos cronologías culturales (Paracas Cavernas y Paracas Necrópolis) y un estilo de cerámica (y otra vez, Paracas Cavernas y Paracas Necrópolis, que algunos eruditos llaman Topará) (Silverman e Isbell, 2008).

Esta cultura fue identificada por primera vez en la Península de Paracas, en dos sitios habitacionales en donde se encontraron estructuras de carácter doméstico, escombreras (Cerro Colorado y Arena Blanca) y cuatro cementerios (Cavernas, Cabeza Larga, Wari Kayan, y Arena Blanca) (Tomasto, 2011).

Julio C. Tello excavó las “tumbas cavernas” en Cerro Colorado, también en Paracas; pero es necesario aclarar que el nombre de cavernas dado al estilo de cerámica descubierto por Tello se refiere a la forma de las tumbas, subterráneas, trabajadas en forma de botellones. Además, en las inmediaciones de las “tumbas-cavernas”, Tello ubicó una necrópolis en la ladera de un cerro, donde comprobó diferencias de estilo. Estos dos yacimientos llevaron a Tello a clasificar la cerámica de Paracas en Paracas Cavernas y Paracas Necrópolis (Doig, 1970). Además decidió emplear dos términos identificando dos fases para la cultura Paracas. Cavernas, caracterizada por tumbas en forma de botella, cerámica policroma decorada con resinas aplicadas post-cocción sobre espacios delineados con incisiones, muy peculiar, y por ello distinta a los otros tipos alfareros peruanos y textiles con decoración lineal. Y Necrópolis que fue definida a partir de los enterramientos de fardos funerarios realizados en estructuras domésticas de épocas anteriores, los cuales estaban asociados a cerámica monocroma, generalmente engobada, de color crema y textiles bordados con diseños complejos que representan divinidades, los llamados “mantos funerarios” en los que se bordaron y tejieron figuras siguiendo un patrón previo, a través de lo que se ha dado en llamar “alternación cromática” (Doig, 1970; Tomasto, 2009).

Las obras artísticas e industriales que contienen los núcleos habitacionales y funerarios de la península de Paracas son testimonios de valor excepcional para considerar las culturas de Cavernas y Necrópolis como las de mayor antigüedad en el actual departamento de Ica y, por ende, como el tronco de las ramas culturales que florecieron posteriormente (Tello y Xesspe, 1979).

El estudio de la iconografía Cavernas y Necrópolis ha permitido identificar rasgos similares a Chavín en la fase Cavernas, con sus estilos textiles lineal y de línea ancha, y similitudes con Nazca en la fase Necrópolis, la cual incluye además de los estilos textiles anteriores el estilo de color en bloque (Tomasto, 2009). A pesar de los cambios estilísticos, la continuidad cultural entre Cavernas y Necrópolis es fuerte por lo que se las considera expresiones artísticas de sociedades distintas que compartían una tradición cultural común (Tomasto, 2009).

El conjunto de las evidencias referentes a la cultura de Paracas la muestra como una sociedad con una economía basada en la agricultura y en la explotación de recursos marinos, que con el paso del tiempo fue alcanzando niveles cada vez más altos de complejidad, desde la dicotomía aldea agrícola - centro ceremonial, hasta el desarrollo de centros ceremoniales de carácter regional. En este proceso resalta la adopción de un culto religioso relacionado con Chavín, que en las fases tardías es reemplazado por el culto al denominado “Ser Oculado”, el cual surge en conexión con la práctica de elaboración de las cabezas trofeo. Así mismo, en las fases tardías empiezan a surgir asentamientos fortificados los cuales son testimonio de momentos de cambio en el equilibrio alcanzado en las etapas anteriores (Tomasto, 2009).



AÑOS	COSTA NORTE	COSTA CENTRAL	COSTA SUR	SIERRA NORTE	SIERRA CENTRAL	SIERRA SUR	SELVA ALTA	DESARROLLO CULTURAL SEGÚN JOHN ROWE
2000	REPUBLICA 1822-HASTA NUESTROS DIAS							
1900								
1800								
1700	EPOCA COLONIAL CONQUISTA Y LUCHAS DE RESISTENCIA 1532-1572 VIREYNATO 1542-1821							
1600								
1500								
1400	INCAS 1200-1532							
1300	CHIMU 1100-1470	CHANCA Y 1100-1400					CHACHAPOYAS 800-1470	PERIODO PRE CERAMICO 1800 a.C. HORIZONTE TEMPRANO..... 4000-400 INTERMEDIO TEMPRANO 400-600 HORIZONTE MEDIO 600-1000 INTERMEDIO TARDIO HORIZONTE TARDIO 1400
1200			LA MIBA YEBQUE 900-1370					
1100								
1000								
900								
800								
700	VIRU 200-400 MOCHICA 100-700	LIMA 200-400	PARACAS NECROPOLIS 0-200	NASCA 0-600	CAJAMARCA 200-800	RECUAY 200-600	HUARI 600-900 TIAHUANACO 600-1000	
600								
500								
400								
300	VICUS 200-200							
200								
100	SALINAR 600-100		PARACAS CAVERNAS 700-0					
100								
200								
300	CUSPINIQUE 1400-600							
400								
500								
600								
700								
800								
900								
1000								
2000	HUACA PRIETA	CARAL 2000-1800						
3000								
4000								
5000								
6000							LAURICOCHA	
7000							TELARMACHAY	
8000								
9000					TOQUEPALA (CUEVA)			
10000	HOMBRE DE PAJAN 10000				GUITARRERO 5700 (CUEVA)			
11000	PIKIMACHAY (CUEVA)							

Fig.3.3- Visión cronológica de las culturas peruanas (modificado de Lumbreras L.G., Rowe J.H.).



En una época dentro del Horizonte Temprano o tal vez un poco antes, algunas poblaciones de Paracas se desplazaron hacia el sur, entrando en el sur de la región Nazca como se ha comprobado por el incremento masivo del número asentamientos. La causa de esta expansión no está clara, no se sabe si está relacionada con el aumento poblacional, la degradación ambiental, las tensiones sociales u otras razones poco claras (Van Gijseghem, 2006). Pero la existencia de guerras en la cultura Paracas tardía y Nazca temprana es evidente pues presentan un patrón de asentamiento en colinas estratégicas y fortalezas amuralladas (Arkush y Tung, 2013).

Desde 1997 el Instituto Arqueológico Alemán esta haciendo excavaciones arqueológicas en Palpa en la zona norte de la región de Nazca, evidenciando que la cultura Paracas tiene fuertes raíces en la región de Nazca y que no es solo una cultura costeña (Reindel y Schaich, 2013).

Un equipo de la universidad de Gotinga ha realizado el análisis de ADN mitocondrial en muestras de 131 individuos procedentes de los valles de Palpa (Fehren Schmidt *et al.*, 2009). Los resultados de estos análisis muestran que durante la época Paracas los haplogrupos C y D fueron dominantes en estos valles, existiendo así mismo evidencias de un flujo genético alto al interior de la región (Tomasto, 2009, pág. 93).

La cultura Nazca (1-750 d.C.) de la costa sur peruana tiene sus raíces en la sociedad Paracas (800-100 a.C) (Van Gijseghem y Vaughn, 2008); los mecanismos sociales responsables de las innovaciones que caracterizan su transición son desconocidos (Van Gijseghem, 2006). La cerámica es uno de los criterios utilizados para distinguir las culturas Paracas y Nazca en el registro arqueológico (Van Gijseghem y Vaughn, 2008). Se cree que la tradición Nazca ha evolucionado a partir de la Cultura Paracas. Exámenes morfológicos de restos humanos del Valle de Ica también sugieren que los Nazca no solo son los herederos culturales de Paracas, si no también que son biológicamente los descendientes de los Paracas (Fehren-Schmitz *et al.*, 2010).

La cultura Nazca muy conocida por su cerámica policroma y gigantescas rayas que están gravadas en la superficie del desierto, fue descubierta en los inicios del siglo XX por Max Uhle. Cuestiones respecto a su estructura socioeconómica, su caída, su desarrollo y origen en la cultura Paracas (800-200 a.C) aún están sujetas a polémica y no han podido ser respondidas de forma satisfactoria (Fehren-Schmitz *et al.*, 2010). Fehren-Schmitz, y colaboradores en 2010 y 2011 observaron distancias genéticas cortas entre todas las poblaciones costeñas desde el periodo Formativo hasta el Horizonte Medio, lo cual sugiere una continuidad genética en la costa durante, por lo menos, 2000 años. Sobre la base de esta observación y las evidencias del registro arqueológico, los autores plantearon que no ocurrieron eventos migratorios mayores durante este lapso y que la cultura Nazca (200 a.C.-650 d.C.), así como su predecesora, la cultura Paracas, se desarrollaron de manera autóctona en esta área (Fehren-Schmitz *et al.*, 2011).

3.2 ANCON

Los cráneos deformados antero-posteriormente provienen de los enterramientos de An-



Fig.3.4- Plano realizado por Reiss y Stübel, sobre las Necrópolis de Ancon (1880-1887).



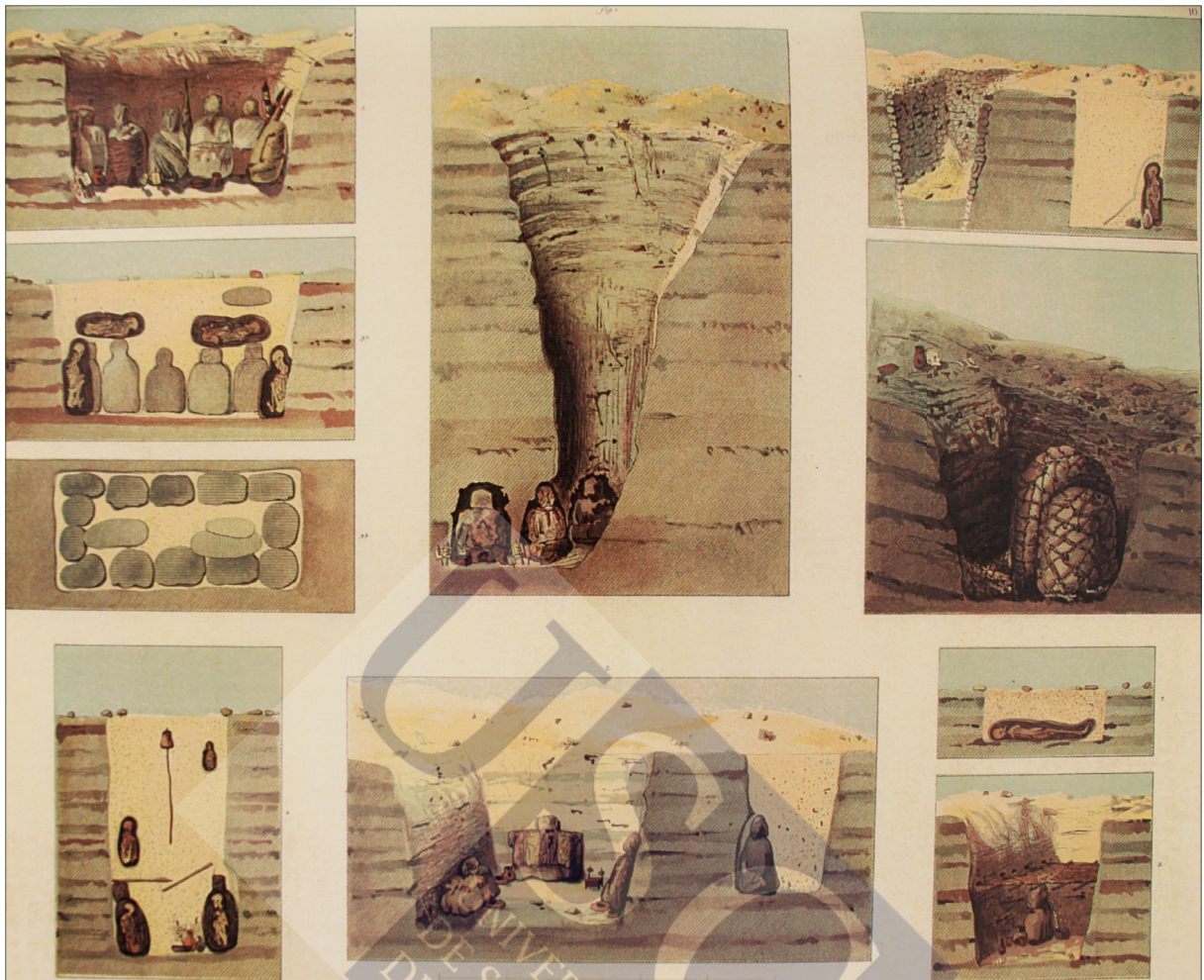


Fig.3.5 - Corte transversal de la estratificación de las tumbas Ancon. In Reiss y Stübel (1880-1887).

con. El yacimiento de Ancon pertenece al periodo cultural del Horizonte Medio (600-1200 d.C.) y se sitúa cerca de 40Km al norte de Lima en la costa central de Peru y fue tradicionalmente incluido en la esfera del Imperio Wari (Slovak *et al.*,2009). Es considerado como uno de los más importantes sitios arqueológicos del Perú por sus dimensiones, por su profundidad cronológica y por su situación como punto de convergencia de las culturas peruanas (Norte-Sur, Sierra-Costa) (Rojas-Sepúlveda y Dutour, 2009). El Horizonte Medio coincide en dicha zona con el desarrollo de las culturas Ancon y Lima. La cultura Ancon es coetanea de la cultura de Paracas al sur y la cultura Wari hacia el altiplano-norte, todas ellas se desarrollan en el espacio temporal de lo que es conocido como el Periodo Formativo.

Ancon se divide tradicionalmente en dos sitios arqueológicos: la parte alta o “las colinas” también llamadas Ancon II y la parte baja o “necrópolis también llamada Ancon I según autores como Rojas-Sepúlveda y Dutour, (2009). O según Slovak *et al.*,(2009): las necropolis de Ancon y la zona temprana de Ancon.

3.3 MAKAT-TAMPU

Los cráneos no deformados provienen del Área Arqueológica de Makat-Tampu, hoy en día soterrada por el área metropolitana de la ciudad de Lima. Pertenecen a la cultura del valle del Rimac, y son del inicio del Periodo Intermedio Tardío; el Periodo Intermedio Tardío tiene lugar entre el 900 y el 1470 d.C. La cultura del valle del Rimac (Pachacamac) se desarrolló después de la Ancón en la misma región y fue contemporánea de la Moche al norte y de la Nazca al sur, éstas últimas pertenecen ya al Periodo de Desarrollo Regional.

Todas estas culturas locales de la franja costera se vieron muy influenciadas por la dominación del imperio Wari.

Los cráneos estudiados corresponden a un intervalo aproximado entre el 100 a.C. y el 1000 d.C. (Datos facilitados por los encargados del MNAAH de Lima). Las edades son similares a otros estudios hechos con cráneos de zonas próximas; Cf: Cheverud (1992).

Se ha intentado atenuar, en lo posible, los procesos microevolutivos que pudieran provocar un cambio en la estructura biológica a consecuencia de factores genéticos o ambientales. Estudios precedentes han mostrado que los especímenes provenientes de los enterramientos de Ancón y de Makat-Tampú presentan una gran proximidad craneométrica, quedando agrupados en el dendrograma de antiguos pobladores peruanos en el mismo cluster (Dittmar, 1996).

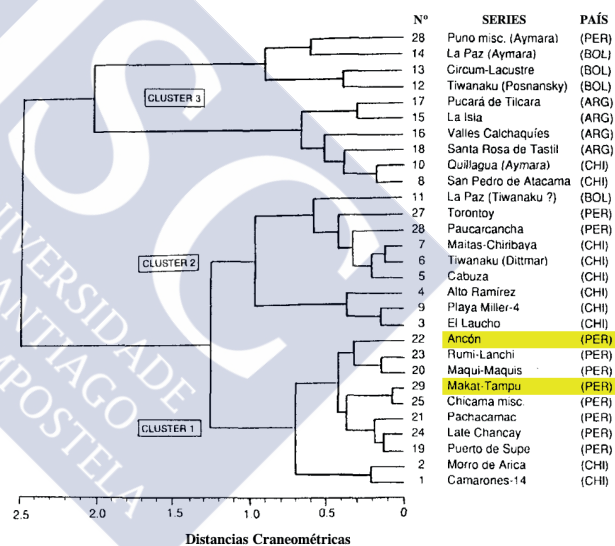


Fig.3.6- Dendrograma de las relaciones craneométricas entre 29 grupos indígenas prehispánicos de America del Sur. Modificado de Dittmar, 1996.





4. MORFOMETRÍA





Como se ha expuesto anteriormente, el objetivo en este trabajo es intentar dilucidar de qué manera repercute la deformación craneal intencionada en el área maxilar; para ello se abordará el estudio desde el punto de vista de los cambios en la forma, es decir, de qué manera las alteraciones conspicuas en la forma de la bóveda craneal afectan o no a las regiones maxilares. La morfometría es un campo que ha sufrido intensos cambios en las últimas décadas. Cambios sustanciales en el concepto radical de lo que entendemos por forma pura y también cambios que se pueden considerar una revolución en los métodos de análisis de la forma establecidos tradicionalmente. A continuación se procederá a realizar una breve introducción sobre las herramientas morfométricas que se han empleado para el estudio que nos ocupa, de su utilidad, de sus ventajas e inconvenientes y de la razón de su empleo en este caso que nos ocupa.

4.1 INTRODUCCIÓN MORFOMETRÍA

La palabra morfometría deriva de dos palabras del griego clásico: "*morphos*" forma y "*metros*" medida y hace referencia, a la cuantificación de una disposición estructural (McIntyre y Mossey, 2003); es por tanto, el estudio cuantitativo de la morfología. La morfología tendría un valor ontológico superior y provendría de los vocablos "*morphos*" y "*logos*" (estudio o tratado). La cuantificación de la variación morfológica, y su posible interacción con la función y el desarrollo, es uno de los objetivos más sugerentes a investigar en diferentes ramas de la ciencia; el empleo de métodos de estudio morfométrico es hoy en día frecuente en la paleontología, la antropología, la biología, y en ciencias biomédicas.

En nuestro ámbito tiene especial relevancia el estudio de la forma de las estructuras craneofaciales, su cambio a lo largo del desarrollo y la interacción que se establece entre los diferentes elementos estructurales y matrices funcionales. Entre estas diferentes matrices craneofaciales es bien conocido y fuente de intensa polémica la posible interacción entre ellas. Es generalmente aceptado que el crecimiento de la base del cráneo influye de alguna manera en el desarrollo maxilofacial (Kasai *et al.*, 1995; Hayashi, 2003). Como ya se ha expuesto anteriormente, los cráneos modificados culturalmente permiten explorar algunas de las relaciones de la bóveda, base craneana y cara (Enlow, 1996; Kohn *et al.*, 1993; Richtsmeier y DeLeon, 2009). Por ello el empleo de métodos morfométricos precisos ayuda al conocimiento de estas interrelaciones, a detectar aquellas zonas con mayor variación, y a ver la posible correlación que se establece entre las diferentes estructuras craneales, incluso en un entorno modificado radicalmente, desde el punto de vista morfológico, como es el de los cráneos en los que la bóveda se ha deformado artificialmente.

Haremos ahora un breve repaso de cómo ha surgido el método de análisis morfométrico



empleado en el presente trabajo y cuáles son sus características. En un primer momento la morfología se centró en el estudio de las estructuras, la subdivisión de éstas y la descripción de sus dimensiones e interrelaciones. El desarrollo de los métodos estadísticos permitió la cuantificación de los cambios de la forma. Un paso más adelante supuso el poder llegar a establecer nexos de unión o estudiar de que manera las diferentes estructuras estaban asociadas o bien eran totalmente independientes. Se aplicaron, de este modo, al estudio de la forma análisis estadísticos multivariados. Los datos en este tipo de estudios conocidos como *morfometría tradicional* o *morfometría multivariada* (Rohlf y Marcus, 1993) estaban constituidos por conjuntos de variables cuantitativas tales como longitud, anchura y altura (Adams *et al.*, 2004; Slice, 2007; Cooke y Terhune, 2015). Es decir, la morfometría hacía referencia a un conjunto de valores cuantitativos que reflejaban una determinada estructura, pero que en realidad quedaban disociados de la propia forma en el momento en que eran estudiados. A finales de los 80 y principios de los 90, comenzó a socavarse el valor de los estudios morfométricos tradicionales, se buscó, el estudio de la *forma pura*, la forma del objeto aislada de todos aquellos elementos que no definen la *geometría intrínseca* del objeto (Adams *et al.*, 2004; Adams *et al.*, 2013). Para ello se definió forma como la información geométrica de un determinado objeto que queda tras proceder a eliminar los efectos de su posición, de su tamaño y de su rotación; esta definición fue dada por Kendall (1977), que sentó de este modo uno de los hitos fundamentales en el desarrollo del nuevo análisis morfométrico. En inglés, en las primeras publicaciones de Kendall, la forma definida de este modo se conoce como *shape* que es distinta de *form* que sería el término en el que el componente estructural geométrico se ve complementado o contaminado por los tres factores que antes se han expuesto y que serán excluidos en los procedimientos geométricos propuestos por Kendall para el análisis de la forma. A este nuevo enfoque se le denominó *morfometría geométrica* (Adams *et al.*, 2004).

Definida como la fusión empírica entre el análisis matemático de la geometría y la biología por Bookstein (1982), la morfometría geométrica permite el estudio de la forma en el conocido como *espacio forma* (o *espacio de Kendall*) que, como veremos, no es un espacio Euclídeo, es un espacio esférico, y tiene que ser modificado y proyectado sobre un plano euclidiano para poder aplicar de este modo los análisis estadísticos multivariados con los que se realiza el análisis morfométrico (Zelditch *et al.*, 2004). Este estudio de la forma pura (*shape*) se puede llevar a cabo en el espacio bi o tri dimensional (Richtsmeier *et al.*, 2002), utilizando para ello diferentes tipos de datos; coordenadas de los *landmarks* (puntos de referencia, o hitos). En este trabajo vamos a emplear la denominación anglosajona *landmark* pues la palabra castellana “hito”, el más adecuado, según la Real Academia de la Lengua Española como traducción de “*landmark*”, no nos parece especialmente apropiado por sus otras acepciones y tampoco facilita la comprensión, por parte del lector. También la comparación con la bibliografía ya netamente definida a este

respecto, y prácticamente en inglés, es más conflictiva. Otro problema es que entre los autores que han escrito en español sobre morfometría geométrica no hay unanimidad en el empleo de un solo término para el concepto de *landmark*, así es frecuente encontrar: hito, marca, marcador, marca de campo, punto de referencia, etc. Por tanto, mantendremos la palabra anglosajona.

Las coordenadas de estos *landmarks* pueden reconstruir el contorno de curvas o incluso superficies 3D (Adams *et al.*, 2013). Son, en definitiva, una herramienta útil para la caracterización cuantitativa, análisis y comparación de las formas biológicas desde un punto de vista geométrico estructural (Bookstein, 1991; Hennessy y Stringer, 2002; Zelditch *et al.*, 2004; González-José *et al.*, 2008) pues desnudan la información geométrica que posee una estructura (Rohlf y Marcus, 1993).

Una de las características constitutivas de la morfometría geométrica es que sus herramientas permiten el estudio de la forma pura, produciéndose para ello un escalado del tamaño de los organismos, es decir, evitando los sesgos estadísticos que se producen en la morfometría multivariable clásica; estos son especialmente peligrosos cuando hay grandes diferencias de tamaño entre los distintos individuos integrantes de la muestra. La Morfometría Geométrica es especialmente útil cuando se desea saber de qué manera se altera la forma de diferentes individuos sin tener en cuenta el tamaño que claramente alteraría los valores dimensionales, aunque, como se verá más adelante, algunos autores consideran que el tamaño siempre queda asociado de alguna manera a la forma y que hay elementos residuales, propios del tamaño, que siempre van a estar presentes en los análisis morfológicos. La morfometría geométrica nos proporciona, de este modo, análisis robustos y, como veremos, herramientas gráficas que permiten cuantificar y visualizar la variación morfológica intra e interespecífica y, lo que es más importante, detectar en qué zonas se produce un mayor cambio. Esto significa que en morfometría geométrica la forma del objeto no se describe en base a sus dimensiones, sino a la relación espacial de cada una de sus subestructuras (Adams *et al.*, 2013; Benítez y Püschel, 2014). En definitiva, en la morfometría tradicional, cada una de las variables es analizada estadísticamente, en realidad de una manera independiente de la forma del objeto, en morfometría geométrica las variables que entran en el estudio permanecen interrelacionadas y siempre van a hacer referencia a la estructura espacial del objeto (Rohlf y Marcus, 1993).

La morfometría geométrica se fundamenta en una matemática relativamente compleja (basada en el álgebra matricial que se construye a partir de las coordenadas de los *landmarks*) (Benítez y Püschel, 2014), y aunque, los teoremas matemáticos y los axiomas biológicos en los que se basa no son especialmente asequibles y fáciles de comprender (Schaefer y Bookstein, 2009), sus objetivos y su manera de proceder son muy intuitivos pues permite la expresión de los resultados de forma gráfica, de manera que hace accesibles los resultados que se obtienen tras el análisis multivariado y simplifica mucho la elaboración y discusión de los resultados



estadísticos de funciones ordinales (es, por tanto, una herramienta diseñada para permitir la visualización de los resultados) (Benítez y Püschel, 2014).

4.2 LA OBTENCIÓN DE LOS DATOS

Originariamente la morfometría obtiene sus datos a partir de la captura de la forma de estructuras en 2D o 3D utilizando *landmarks* (puntos de referencia) homólogos; veremos más adelante qué significado y relevancia tiene esto de la homología dentro de los *landmarks*. Estos *landmarks*, aunque son definidos por el observador y configuran uno de los puntos clave en el método de trabajo, tienen como característica definitoria que, en su conjunto, han de ser representativos de la forma de la estructura a estudiar. Cada *landmark* bidimensional tiene dos coordenadas cartesianas (x, y). Los estudios 3D tienen *landmarks* con tres coordenadas (x, y, z) (Bookstein, 1991). En lo que a la recogida de los datos 2D se refiere y su digitalización, pueden obtenerse a partir de las fotografías o imágenes de rayos x usando un software como el tpsDig. (Webster y Sheets, 2010; Baab *et al.*, 2012) que convierte en coordenadas cartesianas los puntos definidos por el observador, esto vuelve este proceso más accesible y sencillo (Loy y Slice, 2010).

En los últimos años han surgido varios métodos para el estudio de estructuras 3D complejas y se ha propuesto la utilización de herramientas de recopilación de datos más sofisticadas como el digitalizador Microscribe, scanners de superficies, tomografía computarizada, etc (Webster y Sheets, 2010; Cooke y Terhune, 2015). Como ésta no ha sido la metodología empleada en el presente trabajo nos circunscribiremos a los estudios 2D.

En la actualidad existen varios paquetes informáticos para morfometría que comparten una serie de componentes comunes a todos ellos, esos son: el proceso de superposición de Procrustes, y el posterior tratamiento de los datos con análisis estadísticos básicos de forma [(análisis de componentes principales (PCA), análisis de varianza múltiple MANOVA, regresión, etc)]. También es muy relevante, la visualización de los resultados por medio de las rejillas de transformación de la *Thin-plate Spline* (TPS) (deformación de placa delgada). Entre los programas podemos referir las series TPS de F. de James Rohlf., el MorphoJ desarrollado por Klingenberg (2011) y el Morpheus de Slice (Slice, 1998), varias son las posibilidades, algunos son complementarios a otros y algunos son de libre disposición lo que, a pesar de la complejidad en su manejo, dada su gran utilidad, ha aumentado mucho su difusión (von Cramon-Taubadel *et al.*, 2007).



4.3 LOS LANDMARKS

Hablaremos ahora someramente acerca de las características de los *landmarks*, que son, como ya se ha expuesto, los configuradores de los datos que se van a manejar durante el estudio, cruciales para el desarrollo de este y que tienen que cumplir, por tanto, una serie de requisitos.

La mayor ventaja del método de la morfometría geométrica, en lo que a los *landmarks* se refiere, y, en radical diferencia con los métodos tradicionales, centrados, como hemos visto, en las distancias entre *landmarks*, es la preservación de la totalidad de la geometría de los especímenes en estudio y que la representación gráfica de los resultados es posible en términos de nubes de distribución de puntos de *landmarks* en vez de los cuadros estadísticos normales (Adams *et al.*, 2004; Baab *et al.*, 2012). Esto permite la generación de gráficos que muestran de manera precisa e intuitiva los cambios en la forma de los diferentes grupos analizados (von Cramon-Taubadel *et al.*, 2007).

Veremos en un primer momento las características que han de tener los *landmarks* a partir de los cuales se obtendrá la nube de datos.

4.3.1 HOMOLOGÍA

La aplicación de la morfometría geométrica a la antropología y a la anatomía evolutiva es relativamente reciente, y esto plantea una serie de desafíos (Hennessy y Stringer, 2002). Es fundamental tener en cuenta que la calidad y veracidad del estudio se basa en la identificación y cuantificación de *landmarks*, que han de tener como discriminante radical la definición siguiente: “el *landmark* ha de ser un punto de correspondencia en un objeto que se pueda identificar de forma inequívoca entre y dentro de las poblaciones” (Dryden y Mardia, 1998; Webster y Sheets, 2010). De este modo se introduce como primera condición en la definición de un *landmark* el concepto de homología, así para Zelditch *et al.*, (2004) y Webster y Sheets, (2010) los *landmarks* han de ser puntos biológica y geoméricamente homólogos entre los especímenes estudiados. Esto es especialmente relevante cuando son diferentes las especies estudiadas y los *landmarks* han de hacer referencia a una estructura ancestral común. Si bien este aspecto de la homología, en el presente trabajo, no tiene especial relevancia pues todos los individuos estudiados pertenecen a la misma especie, si hay un aspecto, referido a la homología que tiene importancia que es que los *landmarks* han de ser discretos, es decir que han de ser perfectamente diferenciables de las estructuras que los rodean (Toro *et al.*, 2010).



4.3.2 CONSISTENCIA EN LA POSICIÓN RELATIVA

Es importante que la posición los *landmarks* se mantenga en los diferentes individuos integrantes de la muestra. No se debe producir una superposición de alguno de los *landmarks* elegidos en algunos de los individuos o la desaparición sistemática de alguno de ellos pues esto cambia la topología de la muestra y genera problemas con el rigor del álgebra del análisis. No es un problema en lo que a las muestras analizadas en el presente trabajo se refiere.

4.3.3 COBERTURA ADECUADA DE LA FORMA

Los *landmarks* han de reflejar de manera adecuada y no repetitiva la forma que se quiere estudiar en la muestra. Es importante que la forma quede perfectamente recogida por la distribución de los *landmarks* y también es importante no exceder el número de *landmarks* pues esto resta fiabilidad a los resultados desde el punto de vista estadístico. El tamaño total de la muestra debe ser idealmente cuatro veces el número de *landmarks* (Zelditch, 2004). En este estudio el tamaño de la muestra de alguno de los grupos es reducida debido a la dificultad para obtener los especímenes adecuados, esto se puede compensar incrementando el número de individuos en los otros grupos que son de más fácil adquisición (Klingenberg, 2012, comunicación personal).

4.3.4 REPETIBILIDAD

Es muy importante que el *landmark* sea fácilmente identificable, que esté bien definido y que esté presente en todos los especímenes de la muestra, de modo que cualquier observador que proceda a repetir el estudio sea capaz de volver a obtener los datos. Esto tiene que ver con la reducción del posible error, error dependiente del observador, tan importante en estos estudios morfométricos. Esta condición está estrechamente relacionada con la homología pero tienen aspectos diferentes.

4.3.5 COPLANARIDAD

Es este un aspecto relevante en el presente estudio, el que los *landmarks* de un estudio no se hallen en el mismo plano condiciona la interpretación de los resultados; es diferente la interpretación de las diferencias de posición o de disposición estructural entre *landmarks* que se hallan en el mismo plano (ie. en la línea media) o bien el comparar estos *landmarks* con otros que no comparten este plano y que claramente se verán influenciados, por ejemplo con cambios que se producen en el plano frontal y que no están recogidos en el estudio. La cefalometría tradicional,



tan extendida en la actualidad en el ámbito odontológico, presenta grandes limitaciones a este respecto, la aplicación de morfometría geométrica al estudio de radiografías laterales mejora bastante la interpretación con respecto a la cefalometría clásica pero hay que tener en cuenta que presenta las limitaciones inherentes a una proyección bidimensional de una estructura tridimensional (Moyers y Bookstein, 1979) de todos modos, una forma de compensar esta situación desventajosa consiste en establecer unos *landmarks* robustos, es decir cuya identificación (repetibilidad y homología) no sea cuestionable. Más adelante se procederá a analizar someramente algunos aspectos relevantes de este tema.

En base a lo expuesto anteriormente sobre algunos de los requisitos que precisan los *landmarks*, se puede afirmar que el criterio para selección de los *landmarks* ha de regirse tanto por la situación definitiva del punto como por la capacidad que tiene para proporcionar información sobre el hecho morfológico estructural que nos ocupa. Diversos autores han defendido varios tipos de *landmarks* (Bookstein, 1991; Valeri *et al.*,1998) pero todas las definiciones de *landmarks* y clases de *landmarks* comparten el concepto de los *landmarks* como un punto de localización de una determinada geometría (Valeri *et al.*,1998).

4.3.6 TIPOS DE LANDMARKS

La clasificación más conocida y generalizada es la realizada por Bookstein (1991), quién definió originalmente tres tipos de *landmarks*:

Landmark tipo 1- juxtaponción discreta de los tejidos, centros de estructuras pequeñas o intersección de dos curvas (en nuestro ámbito el nasion es un ejemplo claro). Son, por definición, aquellos marcadores de zonas de diferenciación tisular y los que estarán más en relación con el crecimiento de las estructuras que lo rodean. Son los *landmarks* que debieran predominar en un estudio de morfometría geométrica, pero frecuentemente son difíciles de fijar en estructuras muy complejas.

Landmark Tipo 2- máximos de curvatura (es decir, el punto más profundo en una depresión, o el más saliente en un proceso), son limitados en cuanto a la información de los tejidos que los rodean, al menos en una dirección carecemos de información de la estructura (es un ejemplo típico el gonion).

Landmark tipo 3- puntos extremos o que se definen en virtud de la información de estructuras distantes (es decir, el punto final o centroide de una curva o función); son típicos aquellos *landmarks* extremos de la craneometría clásica como por ejemplo el vertex de la bóveda craneal. Se ven influenciados por aspectos no relacionados con la forma pura, como por ejemplo el tamaño.





Fig.4.1- Clasificación *landmarks*. Tipo I nº1 - Nasion
Tipo II nº2 - Pogonion y nº 3 - Gonion
Tipo III nº 4 - ENA Tipo IV nº5 - Articular.

Esta definición de 3 tipos de *landmarks* originalmente incluía, dentro de la acepción tipo 3, los *semilandmarks*, pero Weber y Bookstein en 2011 procedieron a redefinir la clasificación original, para definir los *semilandmarks* como los *landmarks* caracterizados por la información proveniente de múltiples curvas y simetría (es decir, intersección de dos curvas o la intersección de una curva y una sutura) e identificaron 3 subtipos de *semilandmarks*, Weber y Bookstein (2011).

Tipo 4- *semilandmarks* en curvas, frecuentemente dependen de la posición de otros *landmarks* o estructuras y pueden verse desplazados dependiendo de la posición de estos.

Tipo 5- *semilandmarks*

en superficies.

Tipo 6- *semilandmarks* construidos (es decir, el comienzo y el final de una curva) (Cooke y Terhune, 2015).

De este modo, siempre que sea posible, ha de procurarse el empleo de *landmarks* tipo 1 o tipo 2 (en su defecto) para darle fiabilidad a los resultados; de todos modos, es conveniente recordar que la morfometría geométrica es un elemento de análisis y de estudio de la forma y que no ha de ser interpretada como un factor limitador del estudio, sino que ha de ser considerada como un elemento que ha de ayudar a dar respuesta fiable a la veracidad o no de las hipótesis planteadas.

La localización de cada *landmark* puede ser registrada matemáticamente como una coor-

denada bi o tridimensional, resultando en un mapa espacial de la localización relativa de los puntos seleccionados. Cuando se analizan los mismos *landmarks* en varios especímenes nos referiremos a ellos como *landmarks* correspondientes (Richtsmeier *et al.*,2002). Como ya se ha comentado anteriormente, puede haber una base filogenética en esta correspondencia (incluso en diferentes especies, se llamarían en este caso puntos homólogos), puede haber una correspondencia estructural, de desarrollo o incluso biomecánica (Richtsmeier *et al.*,2002).

De todos modos, es conveniente tener en cuenta que se ha producido cierta tolerancia respecto a los rigurosos criterios originales de homología biológica de los *landmarks*, tanto en estudios 2D como en 3D, para permitir la identificación de *landmarks* que puede que no sean estrictamente homologos biológicamente, pero que lo son en cambio matemáticamente (Klingenberg, 2008; Gunz y Mitteroecker, 2013; Cooke y Terhune, 2015). Una vez más surge el concepto de que la morfometría geométrica es una herramienta de estudio y no un conjunto cerrado de normas que definen un método excluyente y cuyo estricto seguimiento es el objetivo del trabajo.

La utilización de los *landmarks* se ha desarrollado mucho en estos últimos años pues como hemos visto son repetibles y dan una información geométrica en términos de la posición relativa de los puntos, quedando inter-relacionados entre sí, por ello se ha desarrollado un sofisticado arsenal de métodos para su análisis (Richtsmeier *et al.*,2002).

Sin embargo, el análisis de los *landmarks* no está exento de problemas. Estas coordenadas deben ser registradas, en un plano Cartesiano, con respeto a ejes de coordenadas definidos. Por tanto, sus valores numéricos reflejan la posición única en el espacio de la estructura a medir, la orientación de cada espécimen con respecto a esos ejes y su rotación. Además, el tamaño del espécimen también esta codificado en la distribución espacial de las coordenadas (Slice, 2007). Queda por tanto pendiente el siguiente paso para el estudio de geometría morfométrica el trasladar estas estructuras al espacio de Kendall en el cual quedará la forma pura.

Aunque, como se ha expuesto anteriormente, los datos que nos proporcionan los *landmarks* son adecuados para el estudio en cuestión, debemos también tener en cuenta que dependiendo de los *landmarks* que decidamos emplear y de su error de medición/localización que podemos llevar a cabo, vamos a tener o no un resultado más o menos fiable (Richtsmeier *et al.*,2002).

4.4 ERROR DE MEDIDA

El proceso de extracción de coordenadas de *landmarks* siempre está asociado con cierto grado de **error en la medida**. Clásicamente se definen dos tipos de error que pueden ser cuantificados: el **error de sistema**, que es el error que afecta a la totalidad de los especímenes de la misma manera y que es inherente al método de aproximación a al fenómeno natural que se desea estudiar. Puede ser debido en este tipo de estudios a distorsiones en los elementos ópticos



empleados en la captura de la imagen, errores en la calibración de los aparatos empleados en la digitalización de las imágenes o también desconocimiento de los *landmarks* propuestos. La solución para reducir este error es la selección de un método preciso y la realización de un estudio paralelo con otro método para comprobar la veracidad del empleado. El otro error es el **error aleatorio**; este error afecta a cada medida de manera distinta a las otras, y se produce incluso en la replicación de las medidas; está relacionado con imágenes imprecisas, digitalizaciones pobres y pixelado o imágenes de baja resolución. La solución frente a este error es realizar las medidas de manera muy cuidadosa y realizar una replicación de las medidas para valorar el grado de correlación entre ellas y por tanto tener claro la varianza que es debida al proceso de estudio de la muestra. El error de medición puede ser minimizado por un montaje cuidadoso de los modelos, una fotografía cuidada y mediante cuidados en la selección de *landmark* pero nunca puede ser totalmente eliminado; replicar la obtención de la imagen y la digitalización de las muestras deben ser un componente obligatorio de cualquier estudio. Los resultados de la comparación de forma entre muestras deben interpretarse siempre con respecto al error de medición dentro de la muestra (Webster y Sheets, 2010).

4.5 LA PERSISTENCIA DEL TAMAÑO DENTRO DEL ANÁLISIS

La morfometría por definición se circunscribe al estudio cuantitativo de la forma, y, de manera intuitiva, percibimos que “*forma*” encierra el concepto de tamaño y forma. Richtsmeier *et al.*,(2002) defienden que las diferencias de tamaño no pueden ser, en realidad, nunca removidas o eliminadas totalmente, por lo que nunca analizaremos una forma pura, lo que sí es posible es analizar una forma con referencia a una variable de tamaño que podemos pre-definir. Y “*tamaño*” y “*forma*” son biológicamente dependientes y frecuentemente están estrechamente interrelacionados. Como hemos visto uno de los objetivos de los estudios de morfometría geométrica es intentar limitar en lo posible la correlación entre tamaño y forma. Para intentar reducir la influencia del tamaño, se procede a escalar los datos empleando como constante una media geométrica de todas las distancias lineares al cuadrado al centro de gravedad de la estructura (centroide), a este dato se le denomina tamaño del centroide (*centroid size*) (Richtsmeier *et al.*,2002). Procederemos a ver con un poco de más detalle estos pasos.

4.6 ANÁLISIS DE COORDENADAS

Existen diferentes métodos y modelos disponibles para llevar a cabo el análisis de coordenadas de *landmarks*. Estos incluyen técnicas de superposición Procrustes, *Euclidean Distance Matrix Analysis* (EDMA), *Finite Element Scaling Analysis* (FESA), and *Thin-plate Spline Analysis* (TPS) (Adams *et al.*,2004). La elección del método y la secuencia del modelo depende



de varios factores, incluyendo la naturaleza de la estructura a analizar, la elección de los *landmarks* a utilizar y las cuestiones a las que la investigación desea dar respuesta (Gillick, 2012).

El método más utilizado en morfometría geométrica para extraer la información sobre la forma (forma pura *–shape*) que contienen los datos no elaborados de coordenadas se llama la *Generalized Procrustes Analysis* (análisis generalizado de Procrustes - GPA) (Kendall, 1977; Baab *et al.*, 2012) y es el primer paso en la morfometría geométrica (Baab *et al.*, 2012; Cooke y Terhune, 2015). Dos de las ventajas del *Generalized Procrustes Analysis* son su consistencia con la teoría matemática de la forma (*shape*) y sus ventajosas propiedades estadísticas (Gillick, 2012). A partir de ese momento los análisis posteriores no se realizarán sobre los *landmarks* aislados, sino sobre la configuración estructural de todos los *landmarks*.

El nombre de Procrustes proviene de un personaje de la mitología griega para el cual el tamaño de sus huéspedes no presentaba problema pues, después de ser gentilmente invitados a reponer fuerzas en su cueva, eran “adaptados” concienzudamente a la cama que para ellos Procrusto tenía reservada. Este personaje procedía a realizar un burdo “escalado” de los huéspedes cortándoles lo que les sobraba para encajarlos en el lecho. Hay que decir que como fanático del proceso de ajuste de tamaño, tras una somera valoración del tamaño del huésped durante la cena, Procrusto preparaba siempre un lecho en el que el huésped no encajaba, de modo que siempre se tenía que ver obligado a recortar los sobrantes.

Tras esta breve digresión histórica, comentaremos el análisis Procrustes. Hay dos tipos de superposición Procrustes (o ajuste Procrustes): la superposición Procrustes ordinaria en la cual una configuración se ajusta a otra configuración (destino) y la superposición Procrustes generalizado (Klingenberg, 2015). La superposición Procrustes generalizado es un método que primero traslada las configuraciones de los especímenes a una localización común mediante la superposición de sus centroides (centros geométricos o centro de gravedad que es el punto que define su posición en el nuevo espacio matemático). El paso siguiente es la reducción a escala de cada configuración. Como elemento reductor emplea el tamaño centroide (*centroid size*) de cada estructura (Kendall, 1977).

El tamaño de centroide es una medida de la dispersión de los *landmarks* alrededor de su centroide y se calcula como la raíz cuadrada de la suma de las distancias al cuadrado de todos los *landmarks* hasta el centroide (Cardini y Elton, 2007). Es un concepto geométrico independiente de la forma, es decir, formas totalmente diferentes pueden tener un mismo tamaño de centroide (Zelditch *et al.*, 2004). En este momento en que las estructuras han sufrido una traslación y un escalado se dice que se hallan en el espacio pre-forma, es el espacio pre-Kendeliano; en este espacio se pueden rotar todas las estructuras de manera que se encuentren todas ellas lo

más cerca de la *forma consenso*. El paso final en el análisis de Procrustes generalizado (GPA), se produce al eliminar la orientación, rotando de forma rígida (sin alterar la estructura propia) todas las configuraciones hasta que las *landmarks* correspondientes en todos los especímenes se encuentren lo más próximas posible (Baab *et al.*,2012). Entonces sí que ya nos encontramos en el espacio forma, el espacio de Kendall, este espacio es un espacio curvo, hiper-esférico (Zelditch *et al.*,2004).

Como las variables de morfometría geométrica son coordenadas cartesianas, se debe utilizar un sistema común de

coordenadas para especificar la localización de las *landmarks* en todos los objetos (Lawing y Polly, 2009). Así, la superposición Procrustes (*Procrustes Superposition*) convierte los datos de los *landmarks* en coordenadas Procruste, trayendo todos los objetos a un tamaño estandarizado, en lo que concierne a la orientación y posición. O sea, en la superposición Procrustes se produce una rotación, translación y escalamiento rígido de las *landmarks* para que tengan la misma orientación y tamaño. Esto permitirá el estudio de la *forma pura* (Lawing y Polly, 2009). Este

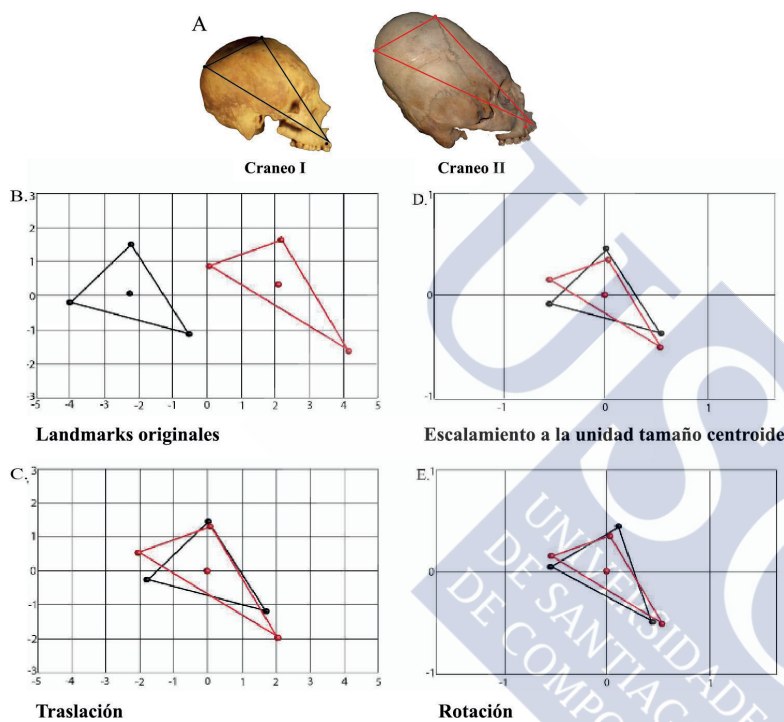
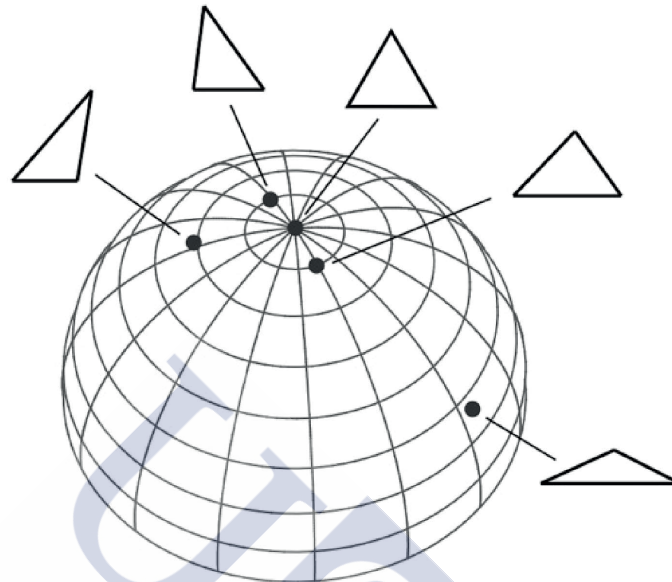


Fig.4.2- Representación de las etapas de una superposición Procrustes para dos configuraciones de *landmarks*. A) Las mismas configuraciones de *landmarks* en dos especímenes distintos. B) *Landmarks* con sus centroides en coordenadas cartesianas. C)Traslación. D)Escalamiento. E)*Landmarks* centrados escalados y rotados. Modificado de Baab *et al.*,2012

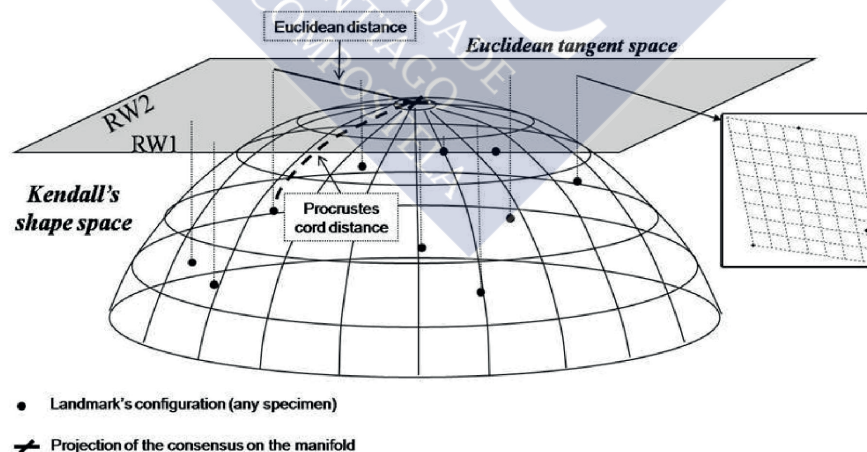
paso, necesario antes de hacer cualquier otro análisis, nos conduce hacia la configuración de consenso a la que habitualmente se llega a través del método generalizado de mínimos cuadrados (GLS, General Least Squares) más conocido en morfometría geométrica como análisis generalizado de Procrustes (GPA) (Zelditch *et al.*,2004). Este proceso elimina el tamaño como un factor de confusión, dejando la forma, dentro de las limitaciones propias del método, como la única variable testable (Baab *et al.*,2012).

Una vez hecho el análisis generalizado de Procrustes (GPA) cada una de las configuraciones

de especímenes (superpuestos) puede ser representada como un único punto en un espacio forma multidimensional (Baab *et al.*,2012). A cada forma corresponde una posición específica en este espacio, y la nube de puntos en el espacio forma refleja las diferentes formas de los especi-



El espacio forma de Kendall para los triángulos es una figura de dos dimensiones con la forma de la superficie de un hemisferio. Cualquier punto en este espacio representa la forma de un triángulo. La figura muestra una representación de este espacio recurriendo a cinco formas diferentes, donde el "Polo Norte" es un triángulo equilátero.



Visualización del espacio tangente euclidiano en el espacio de forma de Kendall paratriángulos. La distancia Procrustes entre una configuración y la configuración media (triángulo equilátero), y su proyección relativa en el espacio tangente. La cuadrícula de deformación de placa delgada a la derecha es resultado de la superposición de una configuración en la otra en el plano tangente.

Fig.4.3- Espacio Forma de Kendall. Modificado de: Mitteroecke y Huttegger 2009; Loy, 2007 y Zelditch *et al.*,2004.



mens de la muestra: cuanto más difieren dos formas, más separadas están en el espacio forma (Baab *et al.*,2012).

Los análisis estadísticos multivariados, como ya se ha comentado, no pueden ser realizados en estos espacios curvos, tienen que ser realizados en espacios euclídeos, por ello, es necesario el empleo de “espacios tangentes” en los que son proyectadas las configuraciones del espacio Kendall. Las coordenadas objeto de superposición y proyección en el espacio tangente pueden de este modo ser analizadas con las habituales herramientas estadísticas multivariadas. Estas coordenadas transformadas se denominan normalmente variables forma (o las coordenadas de espacio tangente) (Baab *et al.*,2012). La distorsión que se produce al pasar del espacio curvo al espacio euclídeo es menor que $p0.02$.

La medida habitual de la diferencia de forma entre dos configuraciones *landmarks* superpuestas se llama una distancia Procrustes (Baab *et al.*,2012). La distancia Procrustes es el valor minimizado durante la superposición del GPA. Así, la distancia Procrustes es una medida de las diferencias en la forma, de modo que una distancia grande implica una mayor magnitud en la diferencia de forma, mientras que una distancia de cero indica que las dos formas son idénticas (Baab *et al.*,2012).

Los objetivos de la mayoría de los análisis de morfometría geométrica se clasifican en tres categorías principales: 1.- Caracterización y cuantificación de las principales direcciones de variación de la forma o covariación en una muestra; 2.- Testar si dos o más grupos difieren significativamente en algún aspecto de la forma; 3.- Establecer la naturaleza de las relaciones entre forma y una o más variables adicionales (Baab *et al.*,2012).

Después de la superposición de los datos de los *landmarks*, las diferencias en las localizaciones de las coordenadas reflejan las diferencias en las formas de las muestras (Slice, 2007). Las coordenadas de *landmarks* pueden entonces analizarse estadísticamente como variables de la forma mediante métodos tales como análisis de componentes principales o los análisis estadísticos multivariados, como la función discriminante y análisis de variables canónicas, para identificar y cuantificar diferencias de grupo (Slice, 2007; Gillick, 2012).

El paso final de un análisis de morfometría geométrica es visualizar gráficamente los resultados de los análisis estadísticos (Adams *et al.*,2004). Para ello se utilizan métodos gráficos que permiten ver los patrones de variación de forma, facilitan las descripciones de los cambios morfológicos y determinan en que zonas de la estructura éstos son más evidentes. Los métodos de ordenación como el análisis de componentes principales (PCA) generan una nube de puntos (*scatterplots*) de los *scores* (valores) obtenidos a partir de este análisis que representan la dis-

persión de las formas en el espacio tangente; el PCA genera unas nuevas variables no correlacionadas entre sí que muestran en que desplazamientos de las variables originales (coordinadas *landmarks*) está la variación de la muestra. Las rejillas de transformación dadas por la *Thin-plate Spline* permiten una descripción de las diferencias de forma entre objetos (Adams *et al.*, 2013). Es decir una representación gráfica de lo obtenido por los análisis estadísticos.

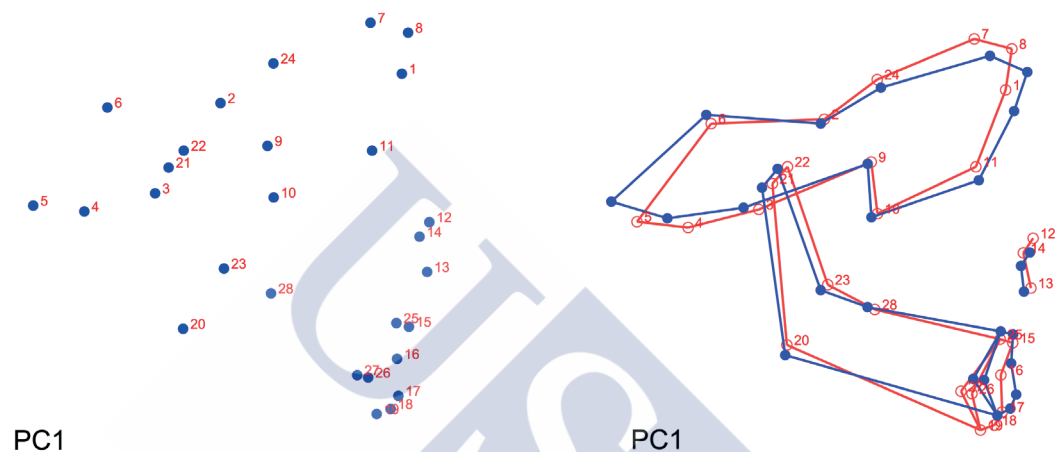


Fig.4.4- Wireframe mandíbula y base craneal

La variación de la forma en una muestra se puede visualizar de varias maneras. Tal vez la forma más sencilla de examinar una configuración de *landmarks* sea utilizando los diagramas *wireframe* (Cooke y Terhune, 2015). Estos diagramas son un conjunto de líneas que conectan los puntos seleccionados de una configuración determinada; estas conexiones son a menudo elegidas para representar características relevantes del objeto que se está examinando (Cooke y Terhune, 2015). Se basan en un concepto antiguo de visualización de cambios de forma por medio de deformaciones de retículas; en una forma elemental fueron presentados ya por Albert Dürer en 1528, y fueron preconizados en 1917 por D'Arcy Thomson como método de análisis de forma.

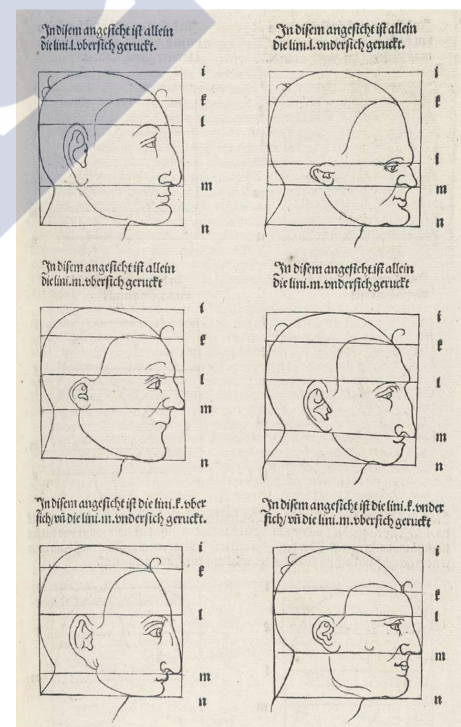


Fig.4.5- Dürer, A. 1528. Vier Bücher von menschlicher Proportion. Hieronymus Formschnyder, Nuremberg.



4.7 ANÁLISIS DE PLACA DELGADA (*THIN-PLATE SPLINE - TPS*)

El análisis de placa delgada (*Thin-plate Spline - TPS*) ha sido propuesto por Bookstein (1991), como herramienta para la comparación morfológica de configuraciones de *landmarks* en dos o más especímenes. Es una técnica para visualización que requiere una configuración de referencia, a menudo una muestra promedio después de que los *landmarks* hayan sido sometidos a una alineación por medio del análisis de Procrustes para que los *landmarks* de la muestra, o las muestras, estudiadas puedan ser comparado. En cada coordenada de *landmark*, los *landmarks* del espécimen en estudio van ser más positivos o negativos que la configuración de referencia y estas diferencias pueden ser visualizadas como flexión o deformación de la placa reticulada (Cooke y Terhune, 2015). O sea, el TPS permite la construcción de las redes de transformación que capturan las diferencias en la forma independiente del tamaño y facilitan una interpretación visual de la energía de doblado (*bending energy*) que se ha tenido que “emplear” en cada espécimen para llegar desde la conformación promedio hasta su forma real. La placa delgada simula, en realidad, a una retícula laminar de metal de espesor infinito y resistencia infinita que detecta y permite deformaciones mínimas. En la retícula se disponen, dependiendo de cada representación, áreas de deformación y áreas de resistencia. En realidad es un puro concepto físico y matemático ajeno a cualquier tipo de concepto biológico. En la rejilla de delgadez infinita, se producen deformaciones uniformes en las cuales las líneas de la retícula muestran una disposición paralela y deformaciones no uniformes, las más frecuentes, en las cuales las líneas de la retícula pierden totalmente el paralelismo y su arqueamiento depende de la localización de la estructura deformada. Es, en definitiva, una elaboración sofisticada de lo que había mostrado D’Arcy Thompson en su esquema del cambio de forma del pez.

El TPS, es un método descriptivo de la forma y de los cambios sufridos por la forma que

se ha desarrollado (motivo de estudio en este momento). Su aplicación al mundo de la variación morfológica es tremendamente útil, el problema es la complejidad de estos estudios en comparación con la morfometría clásica. Cuando se aplica clínicamente el TPS supone una mejora importante por ejemplo de la cefalometría convencional

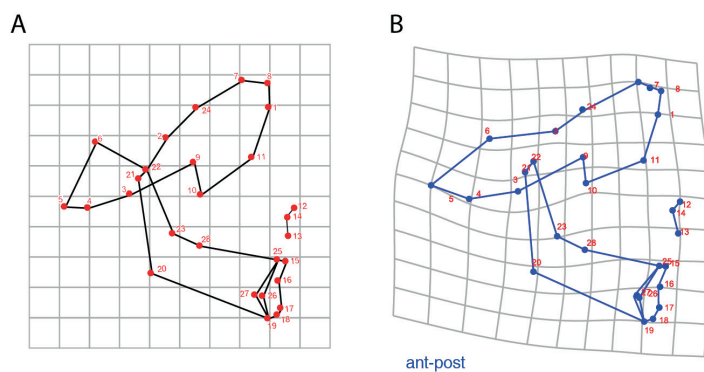


Fig.4.6- TPS. A - Patrón sin deformar B- Deformación.

(Moyers y Bookstein, 1979) que se limita a un estudio, frecuentemente univariable, de diferentes variables morfológicas estrechamente correlacionadas. En los últimos tiempos el análisis TPS ha ido adquiriendo cierta relevancia en ortodoncia, como un método para aproximarse a las modificaciones en la forma relacionadas tanto con el crecimiento facial, como con el tratamiento [Singh *et al.*,1997(b); Franchi *et al.*,2007; Franchi *et al.*,2014].

Las rejillas de deformación que nos da el TPS son uno de los diagramas de la forma más eficaces desde el punto de vista de localización de la variación de la forma en muestras muy amplias (Bookstein, 1991). En la práctica, lo que hace el TPS es la utilización de una función de interpolación para producir deformaciones suaves (Viscosi y Cardini, 2011).

Aunque el TPS se ha empleado más comúnmente para configuraciones 2D, puede utilizarse también para examinar la variación de la forma en un solo plano de una estructura 3D y mucho más recientemente se ha ampliado la función TPS para estudiar la deformación de toda una superficie 3D (Mitteroecker y Gunz, 2009; Cooke y Terhune, 2015).

4.8 ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)

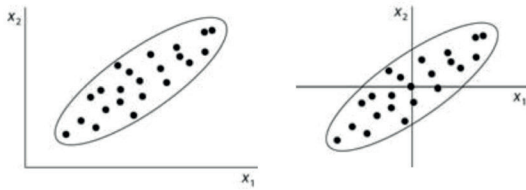
El *Principal Components Analysis* (Análisis de Componentes Principales - PCA): es el método multivariado más comúnmente utilizado para explorar la variabilidad de la forma de configuraciones de *landmarks* después de la *Generalized Procrustes Analysis* (Schaefer y Bookstein, 2009), pues permite una primera exploración y ordenación de la muestra.

El TPS puede emplearse también para visualizar las deformaciones que proponen los diferentes componentes principales obtenidos tras el tratamiento estadístico. Cada componente principal representaría, de este modo, una deformación relativa (*relative warp*) obtenida a partir del análisis informático de las deformaciones parciales (*partial warp*) que es cada uno de los descriptores de un cambio determinado en la forma; se obtiene cuando una deformación principal toma valores determinados en unas coordenadas particulares. De todos modos este lenguaje, de deformaciones, referido a los Componentes Principales (PCs), a pesar de ser empleado con cierta frecuencia por algunos autores, parece estar en fase de derogación debido a resultar confuso y muy poco intuitivo.

El PCA es un método utilizado normalmente para reducir la dimensionalidad de datos multivariados cuando se emplean muchas variables entre las que hay correlación (Goswami y Polly, 2010). Sirve para mostrar cuales son las variables que acumulan la mayor varianza de la muestra.

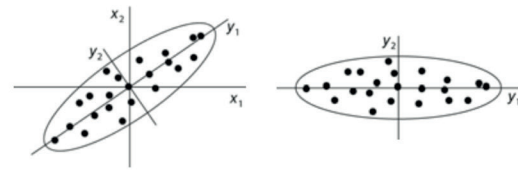


Componentes principales- Etapa 1: Transformacion del sistema de coordenadas



Cambiar el origen del sistema de coordenadas para el centro de gravedad
 Computacion: restar el promedio de los valores de cada variable

Etapa 2: Encontrar los ejes de dispersion y rotando el sistema de coordenadas



Las direcciones de los ejes de dispersion pueden ser computadas como los eigenvectores de la matriz de covarianza. Las nuevas variables resultantes se llaman componentes principales. Las varianzas de las nuevas pueden ser computadas como los eigenvalues de la matriz de covarianza

Fig.4.7- Analisis de Componentes Principales. Basado en los handouts del curso: Klingenberg C. P. Course introduction to geometric morphometrics held at the premises of Sabadel of the Instituto Català de Paleontologia Miquel Crusafont. Barcelona. 2012.

Un PCA hecho a partir de la matriz de covarianza de las coordenadas de forma Procruste da como resultado una serie de combinaciones lineales ortogonales, combinaciones lineales de las variables originales (son los denominados componentes principales: PCs). De tal manera que el primer componente principal (PC1) es una combinación lineal de los datos originales que representa la mayor varianza de la muestra (Schaefer y Bookstein, 2009). Los siguientes PCs van acumulando el resto de la varianza manteniéndose ortogonales a los anteriores PCs, es decir, sin estar correlacionados (Schaefer y Bookstein, 2009). Por medio de los coeficientes (*scores*) se puede saber el grado de participación de cada una de las variables originales en cada uno de los PCs, siendo posible, de este modo, conocer en qué medida esta variable participa en la variación recogida por ese PC determinado. Esto, a diferencia del análisis de morfometría multivariable clásica, se puede visualizar en un TPS, evitando la gran complejidad que suponía la inferencia e interpretación del PCA.

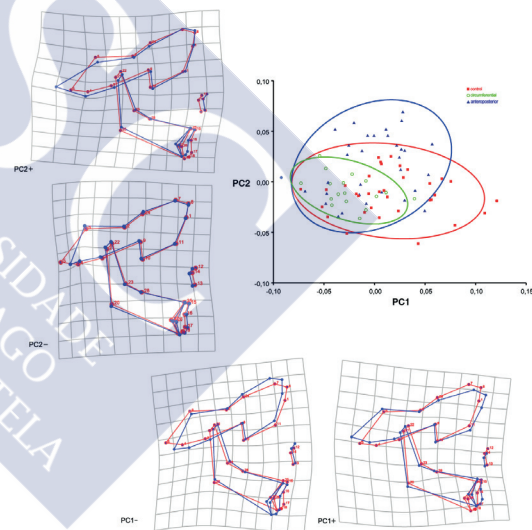


Fig.4.8-Componentes Principales.

Los valores de las formas en los PCs en las retículas (TPS) pueden ser utilizados, como ya se ha comentado, para examinar agrupaciones por similitud de forma y las fórmulas para estas combinaciones lineales se pueden interpretar como diagramas de deformación con la ayuda de la *Thin-plate Spline* (TPS) (Schaefer y Bookstein, 2009).

Por otro lado, los descriptores matemáticos de los componentes principales son los *eigenvalues*

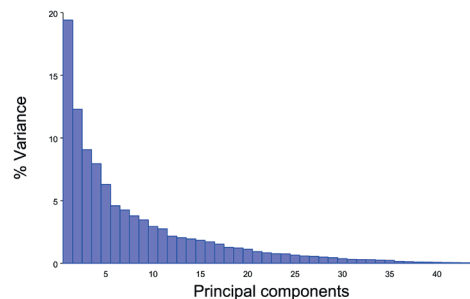


Fig.4.9-Representación de *eigenvalues* de componentes principales



y *eigenvectors* (corresponden a lo que en castellano se denomina autovalores, pero vamos a mantener el término en inglés para evitar confusiones). Los *eigenvalues* son la cantidad de la varianza original explicada en cada PC. La suma de los *eigenvalues* es igual a la suma de su correspondiente matriz de covarianza de modo que colectivamente representan toda la varianza original en los datos [Goswami y Polly, 2010 (a)]. Los *eigenvalues* son una medida cuantitativa de la proporción de la varianza de un conjunto de datos que es explicada por cada componente principal [Goswami y Polly, 2010 (a)]. Se representan en una curva de sedimentación en la que se puede ver de manera gráfica a partir de qué componente principal la varianza total de la muestra queda explicada en una proporción aceptable. Es decir, qué número de PCs es preciso coger para explicar la varianza de forma fiable.

4.9 OTROS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Los métodos estadísticos referidos con anterioridad, que como hemos referido, pueden ser visualizados en el TPS, se emplean fundamentalmente con carácter exploratorio de la naturaleza de variación de la muestra. Hay otros análisis estadísticos que se emplean para testar las hipótesis. En la mayoría de los trabajos se pueden utilizar técnicas estadísticas estándar multivariadas como el análisis multivariado de varianza (MANOVA), el análisis de distancias entre muestras en el espacio forma (es decir, Distancias Procruste o Mahalanobis), análisis de regresión, o análisis parcial de mínimos cuadrados (*Partial Least Squares*, PLS) (Cooke y Terhune, 2015).

Las medidas de distancia son muy versátiles y se utilizan en muchas de las herramientas de GM. Por ejemplo, el de la distancia Procrustes entre *landmarks* homólogos es la medida que es minimizada durante un análisis de Procrustes generalizado (GLS). La distancia Procrustes es la unidad fundamental para determinar el alejamiento de las distribuciones en el espacio forma de Kendall. Por lo tanto, esta medida también puede ser empleada para describir la distancia entre dos configuraciones de referencia en este espacio (Cooke y Terhune, 2015).

Otra técnica que permite medir la distancia entre dos grupos en el espacio forma es la distancia de Mahalanobis, que se emplea en el Análisis de Variantes Canónicas (*Canonical Variate Analysis*, CVA) (Cooke y Terhune, 2015).

La distancia de Mahalanobis difiere de la distancia Procrustes porque esta distancia es escalada por la matriz de covarianza dentro de grupos combinados; por lo tanto, refleja el grado de separación entre grupos y no tiene en cuenta la naturaleza de la distribución de los especímenes alrededor de las formas media (Klingenberg y Monteiro, 2005; Cooke y Terhune, 2015).

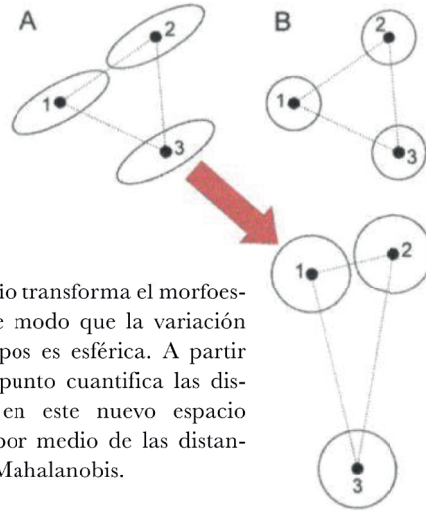


Separacion de los grupos y variacion intra-grupo.



La dirección óptima para medir la separación de los dos grupos es una solución de compromiso. Se ajusta a partir de la mayor distancia entre los grupos con la menor variación intra-grupo.

El Truco



El cambio transforma el morfoespacio de modo que la variación intragrupos es esférica. A partir de este punto cuantifica las distancias en este nuevo espacio forma, por medio de las distancias de Mahalanobis.

Fig.4.10- Análisis de Variantes Canónicas. Adaptado de handouts Klingenberg C. P. Course introduction to geometric morphometrics held at the premises of Sabadel of the Institut Català de Paleontologia Miquel Crusafont. Barcelona. España. 12-15 Junio 2012.

4.10 ANÁLISIS DE FUNCIÓN DISCRIMINANTE (DFA)

El análisis de función discriminante (*Discriminant Function Analysis* - DFA) es, probablemente, el método estadístico más utilizado para investigar las diferencias taxonómicas y es, generalmente, utilizado como un sinónimo de análisis de variantes canónicas (*Canonical Variate Analysis*, CVA) (Viscosi y Cardini, 2011). El DFA se usa preferentemente cuando se comparan dos grupos y la *Canonical Variate Analysis* (CVA) cuando hay tres o más grupos (Viscosi y Cardini, 2011).

En términos generales, el DFA y el CVA son métodos para estudiar la variación dominante en un conjunto de variables, al igual que el PCA (*Principal Component Analysis*). Sin embargo, las combinaciones lineales de las variables originales se transforman en el espacio forma de modo que la variación intragrupal es deformada en un esfera y así se consigue maximizar la separación intergrupos (Zelditch *et al.*, 2004). Esto permite: 1) testar grupos (inferencia estadística), 2) trazar sus diferencias (ordenación) y 3) predecir la afiliación del grupo (clasificación) (Viscosi y Cardini, 2011).

El DFA estudia las diferencias, y permite predecir la afiliación a un grupo. De este modo, da diagramas de dispersión en un espacio de datos que ya no es el mismo que el de las variables originales (Viscosi y Cardini, 2011); esto significa que ya no estamos en el espacio forma generado por la superposición Procrustes (o en su proyección en un espacio euclidiano). Dentro de las muestras, la varianza es comprimida en todas las direcciones alrededor de la media del grupo a fin de hacerlo esférico (Viscosi y Cardini, 2011).

Las mayores diferencias entre las medias se proyectan sobre los ejes que mejor discriminan grupos. En este espacio artificial, transformado, las distancias entre las observaciones se obtienen a partir de las distancias de Mahalanobis y son estandarizadas de manera tal que una unidad de distancia corresponde a una desviación estándar. Las distancias entre observaciones individuales y medias de la muestra permiten estimar la probabilidad relativa de que un espécimen pertenezca a uno o otro grupo (Zelditch *et al.*, 2004). Usando una distribución normal multivariada también se puede estimar la probabilidad absoluta de que un espécimen pertenezca al grupo cuya media es la más cercana. Esto no sólo permite decir a qué grupo pertenece el espécimen sino también en qué medida está dentro o fuera de la gama de la variación típica para ese grupo (Viscosi y Cardini, 2011).

Se pueden realizar diagramas de dispersión de los especímenes en el espacio transformado propio del análisis de la Función Discriminante (Viscosi y Cardini, 2011).

Las limitaciones de DFA, al igual que en otros métodos paramétricos, son que la DFA debe valorarse con cautela porque, a pesar de una relativa robustez, los resultados pueden ser inexactos. Tamaños de muestra heterogéneos, muestras pequeñas y datos altamente multivariados pueden ser particularmente problemáticos. Es una situación que no es infrecuente tanto en estudios taxonómicos como antropológicos con muestras de procedencia arqueológica, esto motiva que la interpretación de los resultados estadísticos pueda llegar a ser poco fiable y que la verificación de las hipótesis se convierta en una tarea difícil. El verdadero objetivo de la DFA es más bien su empleo para fines descriptivos y clasificatorios (Viscosi y Cardini, 2011). Se procede entonces al DFA clásico y al cálculo de la distancia de Mahalanobis desde el espécimen desconocido a cada uno de los centroides, de este modo se asigna el desconocido al grupo al que presenta la distancia más pequeña (Rohlf y Bookstein, 1990, pág. 102).

4.11 ANÁLISIS DE VARIANTES CANÓNICAS (CVA)

El análisis de variantes canónicas (*Canonical Variate Analysis - CVA*) es en esencia similar al análisis de componentes principales. En él se procede a la construcción de nuevos ejes de variación, cada uno una combinación lineal de las variables originales y ortogonal a todos los demás, y los especímenes se ordenan entonces a lo largo de estos nuevos ejes. Sin embargo, cada variante canónica (CV) es orientada (bajo las restricciones de ortogonalidad) para resumir la diferencia máxima entre los grupos (en relación a la varianza dentro del grupo). Así la CVA difiere del PCA en que ésta asume especímenes asignados a grupos pre-definidos y entonces testa (en este caso forma) en qué medida los datos soportan esta asignación. Por supuesto, el soporte puede ser débil si los especímenes que integran cada grupo no han sido clasificados originalmente y pre-agrupados por diferencias en la forma. Además, los ejes del CVA son es-



calados según patrones de variación dentro del grupo y no son simples rotaciones del sistema de coordenadas original. De este modo, una distancia entre muestras (o grupos) en un espacio forma, definido por ejes de CVA, no es necesariamente igual a la distancia entre esas mismas muestras (o grupos) en el espacio forma definido por los ejes originales. El CVA, por tanto, también difiere del PCA en cómo define de forma eficiente la descripción de las diferencias entre grupos en relación con la variación dentro del grupo (independientemente de cómo esto se relaciona con la variación a través de todas las muestras) (Webster y Sheets, 2010).

4.12 EL ANÁLISIS DE MÍNIMOS CUADRADOS PARCIALES (PLS)

El *Partial Least Squares* (Análisis de mínimos cuadrados parciales - PLS) es un análisis que examina la relación (covarianza) entre dos (o más) 'bloques' de datos (*landmarks*) (Baab, 2013; Cooke y Terhune, 2015). El PLS es un método frecuentemente utilizado para caracterizar los patrones de integración morfológica entre bloques *landmarks*. Es decir, es un procedimiento que se puede emplear para conocer el grado de correlación entre diferentes estructuras morfológicas. Es un procedimiento estadístico que cuantifica el grado de covariación entre conjuntos de variables, basándose en la totalidad de la matriz de covarianza (Adams y Felice, 2014). Es un análisis muy utilizado en antropología para examinar la integración morfológica (Bastir y Rosas, 2005; Bookstein *et al.*, 2003; Slice, 2007).

El *Partial Least Squares* (PLS) puede utilizarse para evaluar los patrones de covariación entre conjuntos de datos morfológicos (al igual que en estudios de integración morfológica) o entre un conjunto de datos morfológicos y otro conjunto de datos (como dieta o datos ambientales) (Slice, 2007; Adams y Felice, 2014). El PLS comparte con la regresión múltiple y la correlación canónica el objetivo de investigar la relación entre dos grupos de variables, pero difiere metodológicamente de ambos (Baab, 2013). Una de las ventajas de este enfoque metodológico es que ninguno de los dos conjuntos de variables contrastadas se asume que es dependiente del otro, como ocurre en el análisis de regresión (Adams y Felice, 2014).

Por el contrario, el PLS analiza patrones de covariación entre dos o más bloques de datos. Cuando se emplea en morfometría geométrica (GM), por lo menos uno de estos bloques de datos contiene datos de forma. La relación entre dos conjuntos de ejes es descrita por la correlación PLS, la relación general entre los dos bloques de datos se puede resumir utilizando el coeficiente de RV (Escoufier, 1973; Klingenberg, 2009). Esto hace del PLS una herramienta particularmente útil para evaluar la relación entre conjuntos de rasgos que se presumen que covarian pero para los cuales no hay a priori relación direccional postulada entre ellos (Adams y Felice, 2014).



El PLS muestra cierta analogía con el análisis de componentes principales (PCA), pero mientras que la meta del PCA es encontrar componentes que maximizan la varianza dentro de un único conjunto de variables, un análisis PLS encuentra pares de componentes que maximizan la covarianza entre los dos bloques (conjuntos) de variables (Baab, 2013).

En realidad se puede decir que toda esta compleja batería de análisis estadísticos que despliega la morfometría geométrica puede quedar en un mero constructo teórico con poca utilidad aplicada. En definitiva la GM está seriamente condicionada por el diseño de la investigación y por la habilidad del investigador para estructurar de modo coherente el estudio de la muestra (Schaefer y Bookstein, 2009). Una última consideración referente a la ampliación de las diferencias en el momento de la representación gráfica. Se acostumbra a magnificar las pequeñas variaciones para facilitar su interpretación. Las diferencias pequeñas, aunque resulten significativas según el análisis estadístico, frecuentemente suelen ser difíciles de ver a menos que sean

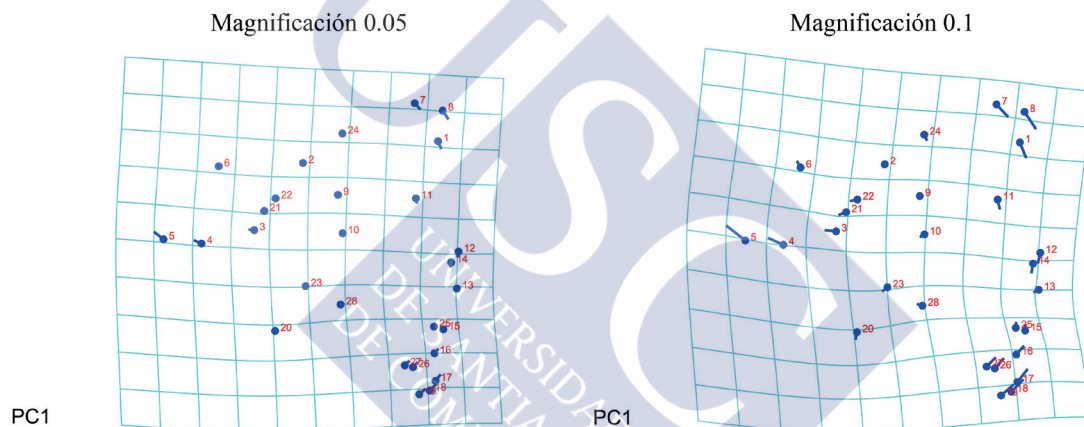


Fig.4.11- Incrementos de la magnificación.

‘magnificadas’. Es preciso incrementar ligeramente la deformación de la retícula para conseguir ver mejor y entender lo que en realidad está ocurriendo con la morfología de la muestra y en que regiones de la estructura se centran los cambios. La magnificación consiste en una simple multiplicación escalar de las diferencias de forma entre una forma de partida y su forma final. Por ejemplo, si una observación tiene una puntuación en CP1 de 0.05, un aumento del doble de las diferencias de forma entre esta observación y la media, se obtendría duplicando las longitudes de los vectores de desplazamiento, la estructura resultante es la forma cuya puntuación en PC1 sería 0.1. Como esta no es una forma real tenemos que ser claros señalando el factor de aumento que se ha empleado y siempre que sea posible utilizar el mismo aumento en todos los diagramas (Viscosi y Cardini, 2011).









5. INTEGRACIÓN Y MODULARIDAD





5.1 INTRODUCCIÓN

El empleo de análisis de morfometría geométrica abrió nuevas expectativas y posibilidades en el estudio de la integración morfológica (Lawing y Polly, 2010). El hecho es que el proceso evolutivo de los seres vivos ha provocado, tras una lenta y constante selección de miles de años, que los organismos funcionen como un todo integrado, pero, es conveniente tener en cuenta que esta aparente interrelación entre sus diferentes partes no es uniforme (Olson y Miller, 1958). Los individuos son un conjunto subdivisible de unidades morfológicas. Estas subunidades integradas suelen diferir unas de otras tanto por la función, como por su estructura anatómica y origen embriológico. La coordinación de diferentes subunidades se ha conocido, desde antiguo, como integración morfológica (Olson y Miller, 1958; Cheverud, 1996) y se ha convertido en foco de atención en la biología del desarrollo evolutivo bajo el epígrafe de *modularidad* (Klingenberg, 2009).

Dentro de este ámbito de la correlación, covarianza, entre estructuras y unidades, surgen los conceptos contrapuestos de integración y modularidad. Estos términos se emplean habitualmente para describir, por un lado la naturaleza coincidente de coordinación (integración), y por otro la autonomía relativa (modularidad) de partes de un organismo (Richtsmeier y DeLeon, 2009).

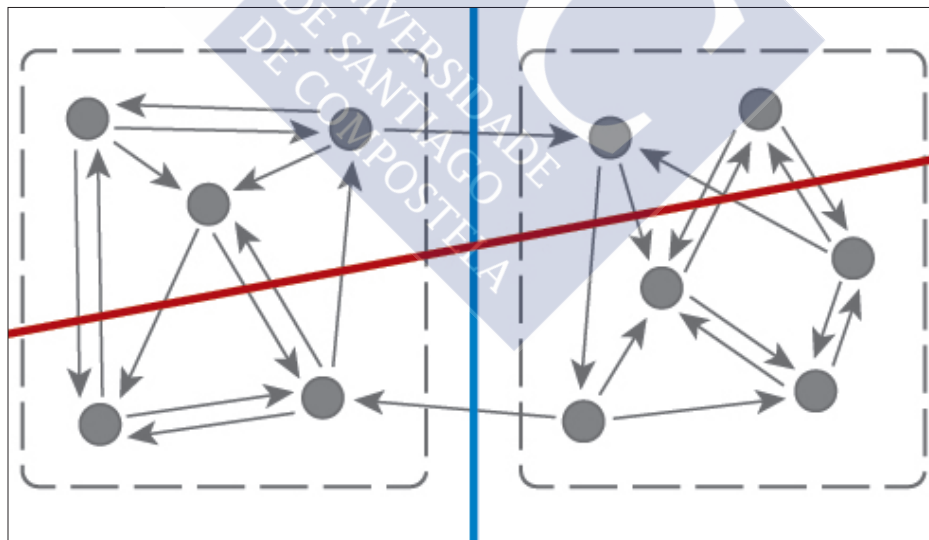


Fig.5.1- Un módulo es un conjunto de rasgos (círculos) que están relacionados de forma coherente internamente por múltiples interacciones (flechas) y que son relativamente independientes de otros módulos, porque hay menos o más débiles interacciones entre módulos.

Una subdivisión de los rasgos que corresponden a la verdadera frontera entre módulos (línea azul) va a producir subconjuntos que están débilmente correlacionados, porque sólo unas pocas interacciones (flechas) unen los rasgos de los dos subconjuntos. En contraste, una subdivisión que no corresponde a la frontera entre módulos (línea roja) resultará en subconjuntos que están unidos por interacciones múltiples y fuertes dentro del módulo, por tanto producirá una fuerte correlación entre subconjuntos.

Modificado de Klingenberg, 2008.

Modularidad. Podemos definir modularidad como el grado de autonomía e independencia de unidades, o módulos que en principio parecen estrechamente integrados, dentro de un organismo. Se entiende que estas unidades están integradas en base a un desarrollo conjunto a partir de un patrón genético común, a orígenes embrionarios comunes, a interacciones estructurales, o bien, a razones de carácter funcional. El primer paso, en un análisis de este tipo, es definir los módulos, para ello se puede proceder a delimitarlos basándose en información biológica, en orígenes embriológicos comunes, o bien caracterizándolos de acuerdo con patrones de rasgos, que desarrollan una función común solo explicable si se establece una fuerte correlación interna (Richtsmeier y DeLeon, 2009).

La modularidad, responde a un concepto de organización de los sistemas biológicos. Distintas unidades funcionales, originadas en un proceso de diferenciación embriológica específico que desarrollan una propia matriz funcional y que, a su vez, promueve la conformación de una unidad dentro de la cual existe una alta integración de muchas y/o fuertes interacciones, pero que a su vez es relativamente independiente de otras de esas unidades (Klingenberg, 2008; Benítez y Püschel, 2014).

Desde el punto de vista del análisis estadístico, la integración y la modularidad están ligadas al grado de covariación entre las partes de una estructura. Esta interrelación estructural puede ser estudiada por medio de la morfometría geométrica. La tarea de la morfometría es determinar, en un primer paso, si una estructura es una unidad integrada simple, o bien, si está integrada por varios módulos. Si la estructura parece integrada por varios módulos, lo que se trata es identificar el agrupamiento de *landmarks* que mejor delimitan estos módulos (Klingenberg, 2009).

De una forma sencilla el término ‘módulo’, como se utiliza aquí denota una unidad que es internamente coherente debido a fuertes interacciones entre sus partes, y que es relativamente independiente de otras unidades, con las cuales si está conectado y tiene interacciones más débiles (Klingenberg, 2009; Gkantidis y Halazonetis, 2011).

Los estudios morfométricos de integración y modularidad emplean métodos que buscan los patrones de integración en una sola estructura o a la fuerza de la integración entre las distintas partes. Generalmente se suele buscar en un primer acercamiento un resultado global. Algunos de estos métodos son típicos de geometría morfométrica, como el análisis de componentes principales, otros son métodos especializados desarrollados específicamente para este propósito (Klingenberg, 2013).

La integración en una estructura morfológica significa que diferentes partes integrantes co-



varian con las demás. En el caso de que la integración sea absoluta, todos los componentes están perfectamente correlacionados, por lo que la variación de las posiciones relativas de una serie de *landmarks* en una región pequeña es suficiente para predecir la variación de las posiciones relativas de los restantes *landmarks*. Si las relaciones son lineales, ésto también significa que toda la variación estará contenida en una sola dimensión del espacio forma. De este razonamiento, se desprende que el análisis de componentes principales, con su enfoque de búsqueda de variación, es una herramienta útil para la integración morfológica (Klingenberg, 2013). El análisis de componentes principales (como ya ha sido comentado anteriormente) define lo que se ha llamado análisis de deformación relativa “*relative warp analysis*” al aplicarlo al TPS “*thin-plate spline*” de Rohlf, (1993). El análisis de componentes principales ofrece dos tipos de resultados principales que son particularmente relevantes para el estudio de la integración morfológica: autovalores (*eigenvalues*) que indican la varianza de forma asociada con cada componente principal (Klingenberg, 2013). Los *eigenvalues* reflejan las varianzas de las puntuaciones de los componentes principales. El primer *eigenvalue* es el que acumula la mayor varianza y es el resultado de una combinación lineal de las variables incluidas en el análisis. Los *eigenvalues* permiten evaluar el grado en el que la variación se concentra en sólo una o pocas dimensiones o, por el contrario, está repartida en muchas dimensiones. Los cambios en la forma asociados con los componentes principales, que se visualizan en los vectores (*eigenvectores*), también nos informan sobre la integración y nos permiten ver si los cambios morfológicos están limitados a unas subestructuras o bien afectan la totalidad de la forma estudiada. Este tipo de información da una noción previa pero presenta muchas limitaciones en lo que a integración y modularidad se refiere (Klingenberg, 2013).

El método morfométrico más ampliamente utilizado en estudios de los patrones de covariación entre conjuntos de estructuras delimitadas por *landmarks* es el *partial least squares* (PLS-Integración entre estructuras o sus partes) (Klingenberg, 2013). Este es un método que tiene algunas características comunes con el análisis de componentes principales pero, en lugar de la descomposición de la variación total de una configuración de *landmarks* en componentes, el PLS descompone una matriz de covarianzas entre dos configuraciones de *landmarks* en pares de ejes (un eje para cada configuración) que muestran características de forma, testando sucesivamente la máxima covarianza entre el uno y el otro. Ambas, la covarianza y las características de forma son de interés en el contexto de la integración morfométrica (Klingenberg, 2013).

Para cuantificar la fuerza de la covariación entre las partes, es posible utilizar índices como el coeficiente de RV (Escoufier, 1973; Klingenberg, 2009).

Klingenberg, (2009) presentó el coeficiente de RV de Escoufier (1973) como una medida escalar de la robustez de asociación entre las coordenadas de dos conjuntos de *landmarks*. El coeficiente puede utilizarse como una herramienta intuitiva para evaluar la fuerza de la inte-



gración entre las estructuras, pero también es útil como una prueba estadística de permutación que testa la asociación en el contexto de PLS o para los análisis de modularidad (Klingenberg, 2013). El coeficiente de RV es análogo a un coeficiente de correlación, pero en vez de medir la asociación entre dos variables individuales, mide la asociación entre dos conjuntos de variables [Goswami y Polly, (a) 2010]. El coeficiente de RV toma valores entre cero y uno. Es cero si todas las covarianzas entre los dos conjuntos de variables son cero, lo que significa que los dos bloques de variables son totalmente no correlacionados entre sí. O sea, cero representa un caso de modularidad perfecta, en la que no hay ninguna covariación entre los conjuntos [Goswami y Polly, (a) 2010]. El coeficiente de RV es uno si uno de los conjuntos de variables difiere del otro solamente por alguna combinación de rotación, escalamiento o traslación (Klingenberg, 2009). El coeficiente de RV puede ser utilizado para evaluar lo robusta que es la integración entre dos conjuntos de *landmarks*, dentro de una estructura única, donde se ha hecho un Procrustes conjunto o para dos configuraciones de *landmarks* con Procrustes separados (Klingenberg, 2013).

Los análisis de la integración pueden utilizar dos enfoques diferentes para cuantificar la covariación entre partes de una configuración de *landmarks*. Una posibilidad es analizar la forma de la configuración en su conjunto y examinar la covariación de partes dentro de ella. La alternativa es analizar las formas de las partes por separado como si fueran configuraciones totalmente independientes y evaluar la asociación entre las diferentes formas. La diferencia entre los dos tipos de análisis consiste en como tratan la información sobre la conexión entre los subconjuntos (Klingenberg, 2009).

El primer método utiliza un único Procrustes para todos las *landmarks* conjuntamente y luego examina la covarianza de los subconjuntos de *landmarks* en la configuración global (Klingenberg, 2009). Por lo tanto, explícitamente considera la información sobre la conexión de los subconjuntos. Es posible que una porción de la covariación entre subconjuntos no venga de la variación simultánea dentro de los dos subconjuntos propios, pero sí de la variación de la forma en que los subconjuntos están conectados. Para este enfoque, los subconjuntos de *landmarks* deben ser mutuamente excluyentes, es decir, cada *landmark* sólo puede pertenecer a un subconjunto (Klingenberg, 2009).

El segundo enfoque, que trata los subconjuntos como configuraciones totalmente separadas, utilizando dos Procrustes independientes para analizar las formas de los subconjuntos de *landmarks* (Klingenberg, 2009). Este enfoque ignora la conexión anatómica de los dos subconjuntos y por lo tanto registrará la covariación entre los subconjuntos sólo si hay cambios comunes de la forma dentro de cada subconjunto (Klingenberg, 2009). La conexión entre subconjuntos puede tenerse en cuenta al incluir *landmarks* que están en el límite entre unidades anatómicamente colindantes en ambos subconjuntos (Klingenberg, 2009).

Mientras que el método de Procrustes separados considera la forma de las partes, cada una



por sí, el análisis basado en un Procrustes conjunto también busca la covariación de los tamaños relativos y la disposición de las diferentes partes. La elección del método se debe basar en si el interés principal está en la covariación de piezas individuales o en la variación conjunta de la estructura como un todo (Klingenberg, 2009).

Si hay más de dos conjuntos de *landmarks*, el coeficiente de RV puede utilizarse para evaluar la fuerza de asociación entre cada par de conjuntos, pero no proporciona una medida global de asociación entre todos los subconjuntos simultáneamente (Klingenberg, 2009).

Si la hipotética partición coincide con una verdadera subdivisión de la configuración en los módulos, el coeficiente de RV entre subconjuntos debe ser más bajo de lo que se espera para las particiones alternativas de la configuración en subconjuntos de *landmarks* (Klingenberg, 2009).

El enfoque más sencillo para evaluar una hipótesis de subdivisión de una configuración de *landmarks* en dos módulos es calcular el coeficiente de RV para todas las particiones posibles en subconjuntos de tamaños adecuados. Si la hipótesis de modularidad se lleva a cabo, el coeficiente RV para la partición de acuerdo con la hipótesis debe ser el valor más bajo, o por lo menos debe estar cerca del extremo inferior de la distribución de coeficientes de RV para todas las particiones (Klingenberg, 2009).

La contigüidad espacial es relevante en el contexto de muchos estudios morfológicos. En primer lugar los módulos deben ser unidades anatómicas coherentes, la contigüidad espacial es una característica importante para la definición de su coherencia e individualidad como unidades.

En el contexto de la morfometría geométrica, las posiciones relativas de *landmarks* pertenecientes al mismo módulo deben integrarse de una forma firme, considerando que la integración entre módulos debe ser más débil.

Para examinar la modularidad del cráneo, Martínez-Abadías *et al.*, (2012) examinaron la hipótesis de que la cara, la base craneal y la bóveda craneal fueran distintos módulos. Si esta hipótesis fuera cierta, cada una de estas regiones debería estar internamente altamente integrada y ser relativamente independiente de las otras dos regiones. Como ya se ha referido, la modularidad puede ser evaluada mediante el análisis de covariación entre los subconjuntos de *landmarks* (Klingenberg, 2008; 2009). Por ello, si la subdivisión de los puntos *landmarks* craneales en subconjuntos corresponde al, o a los, verdaderos módulos la covariación entre los subconjuntos debe ser débil, pues la fuerte integración dentro de los módulos no contribuye a la covariación entre subconjuntos. Por el contrario, si los subconjuntos no corresponden a los módulos verdaderos, la integración fuerte dentro del módulo contribuye a la covariación entre subconjuntos que por lo tanto será más fuerte. En general, se espera que la covariación entre subconjuntos sea más débil para subconjuntos correspondientes a los módulos verdaderos que para las otras particiones de *landmarks* (Klingenberg, 2009).



El coeficiente de RV entre las coordenadas de Procrustes de los conjuntos de *landmarks* puede ser utilizado para cuantificar la fuerza de covariación, si hay sólo dos módulos hipotéticos; pero para más de dos módulos se debe realizar un coeficiente de RV multi set haciendo un promedio de los coeficientes de RV para todas las combinaciones de pares de los subconjuntos de *landmarks* (Klingenberg, 2009). El coeficiente RV o el coeficiente RV multi-set se realiza primero para la partición de *landmarks* en subconjuntos que coinciden con la hipótesis de modularidad y luego para un número de particiones alternativas de los *landmarks* (Klingenberg, 2013).

Como ya hemos comentado, la integración morfológica puede circunscribirse a una variedad de diferentes niveles, dependiendo del origen de la variación y de las observaciones sometidas a estudio (Cheverud, 1982; Klingenberg, 2008).

En la definición de integración morfológica no se ha llegado a ningún consenso sobre el significado y la medición de la integración morfológica. Por ello, Klingenberg (2008) aconseja ser prudente cuando se comparan los resultados de diferentes estudios. Por ejemplo Klingenberg (2008) cita a Goswami (2006, a,b; 2007) que utiliza una formulación matemática que implica una definición distinta de integración, pues considera los *landmarks* como integrados sólo si se mueven conjuntamente y en la misma dirección o en direcciones similares. Otro estudio es el de Monteiro *et al.*,(2005) que define la integración evolutiva de la mandíbula en un grupo de roedores, por la congruencia de distancias derivadas de diferentes porciones de la mandíbula.

5.2 CRÁNEO Y MODULARIDAD

La integración morfológica se ha empleado para el estudio de distintas divisiones del cráneo. Como ejemplos, se pueden resaltar trabajos que incluyen partes como el cráneo y la mandíbula (Bastir y Rosas, 2005), cara y neurocranium (Mitteroecker y Bookstein, 2008), la cara, bóveda craneana y base craneal (Bookstein *et al.*,2003; Bastir y Rosas, 2006; Gkantidis y Halazonetis, 2011; Singh *et al.*,2012), base del cráneo, fosa craneal y rama mandibular (Bastir y Rosas, 2005). En general, estos análisis muestran que la integración entre las distintas partes craneales es bastante intensa, pruebas contra la hipótesis nula de independencia dan resultados estadísticamente significativos siempre que existan tamaños de muestra suficientemente grandes. Los patrones de covariación que muestran los cambios de forma (estudiados con el PLS) sugieren implicaciones biológicas y evolutivas en el origen de la integración (Klingenberg, 2013).

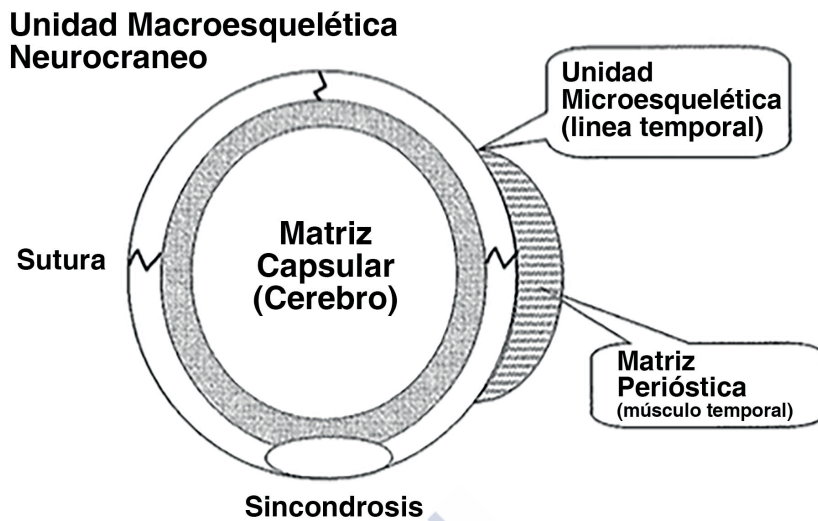


Fig 5.2 El crecimiento primario del cerebro (matriz capsular) provoca un estímulo del crecimiento óseo a partir de las suturas y sincondrosis, esto provoca un incremento del tamaño de la unidad esquelética del neurocráneo. La matriz perióstica, por ejemplo la acción de continuo estiramiento del músculo temporal, provoca un crecimiento puntual en la unidad esquelética con la que interacciona.

Representación esquemática de la Hipótesis de Matriz Funcional.
Modificado de Carlson, 2005.

el paso de paquetes vasculares o la presencia de unidades funcionales bien definidas como el ojo, hacen que los huesos tengan un desarrollo condicionado por el desplazamiento y crecimiento que provoca la demanda funcional de la matriz en la que están englobados. La matriz funcional incluye todos los elementos (organos, tejidos, nervios, espacios funcionales, etc) necesarios para ejecutar una función determinada. La unidad esquelética soporta y protege a su propia matriz funcional (Moss, 1971). De acuerdo con esta hipótesis, es de esperar que los elementos esqueléticos que integran una misma matriz funcional estén más altamente integrados entre sí, que lo que lo están con otros que parecen pertenecer a una matriz funcional distinta (Paschetta *et al.*, 2010).

En el cráneo, tradicionalmente, se admiten dos módulos independientes, por un lado, la bóveda y la base interrelacionadas por el sistema nervioso central y por las meninges (neurocranium), y, por otro lado, el esqueleto facial, que aloja los órganos de los sentidos inervados por los pares craneales, las fosas nasales, y el aparato estomatognático (viscerocranium). Estos módulos están compuestos, a su vez, de distintos sub-módulos, puesto que la modularidad es un concepto jerárquico (ie: el viscerocráneo alojaría subunidades dotadas de cierta autonomía como por ejemplo la órbita y nasomaxilar). La estructura de cada modulo está estrechamente coordinada e integrada en el propio módulo, es decir que un cambio en uno de los integrantes de un modulo (submodulo, ie: un pedículo vasculo-nervioso) provoca una respuesta integrada

Una de las teorías que más ha influido en la concepción modular del cráneo y su división en partes que reflejan las demandas funcionales, es el trabajo de Moss, 1968. En la hipótesis de matriz funcional de Moss, el crecimiento de las unidades esqueléticas es se lleva a cabo condicionado por la función de los tejidos blandos y espacios funcionales que rodean a estas unidades esqueléticas. La inserción de tejidos blandos en el periostio,

y coordinada en otras partes integrantes del modulo (Richtsmeier y DeLeon, 2009). Los *landmarks* nos permiten dividir regiones y estructuras de interés biomecánico, esta subdivisión nos permite conocer y llevar a cabo una representación jerárquica más exacta de los patrones de integración del cráneo humano (Paschetta *et al.*,2010).

Las estructuras que constituyen el cráneo están integradas entre sí porque comparten un desarrollo una función y son fruto de un proceso de evolución común. Sin embargo, esta integración no es completa, hay zonas que mantienen modularidad (Klingenberg, 2008).

Estudios (Bastir y Rosas, 2006) que analizan la covariación basicranial y mandibular sugieren que debido a relaciones espaciales y temporales, la pars lateralis de la fosa craneal media está integrada con la mandíbula y estructuras faciales a diferencia de lo que ocurre con la *pars medialis* (Gkantidis y Halazonetis, 2011).







6. CRECIMIENTO CRANEAL





6.1 INTRODUCCIÓN

Es complejo realizar una revisión somera sobre lo que se sabe hoy en día sobre el crecimiento craneofacial. A lo largo de las últimas décadas se ha llevado a cabo una labor ingente en este aspecto. Muchos han sido los autores que han dedicado gran parte de su capacidad y esfuerzos a este tema; muchas han sido las líneas de investigación que se han planteado para poder probar las hipótesis y varias son las teorías y explicaciones que a lo largo de estos años han ido sobreviviendo en su enunciado original, y otras muchas o han sido abandonadas o bien han sido modificadas sustancialmente y ya no se reconoce el planteamiento primitivo. Buscamos en esta breve introducción, hacer hincapié en aquellos aspectos que suponemos son más relevantes para el presente trabajo. Otros puntos al igual muy relevantes en el crecimiento craneofacial, como muchas de sus posibles aplicaciones o significado clínico, quedarán poco desarrollados, posiblemente siquiera enunciados, no deseamos restarles relevancia, sólo vamos a intentar en un cuerpo teórico tan complejo y tan amplio espigar aquellas ideas que realmente son necesarias para entender nuestro trabajo. Para entender en qué sentido las fuerzas modificadoras aplicadas a un cráneo en crecimiento son capaces de alterarlo morfológicamente.

El cráneo humano es una estructura compleja, que se concibe como un mosaico de unidades funcionales estrechamente inter-relacionadas. Algunas de estas estructuras están dotadas de cierto grado de independencia (denominada frecuentemente modularidad) y otras, en cambio están íntimamente integradas (Moss, 1958; Moss y Young, 1960; Enlow y Hans, 1996; Lieberman *et al.*, 2000). La estructura craneal se ha dividido tradicionalmente en 2 unidades primarias: **neurocranium**, que envuelve y protege el cerebro, y que, a su vez, está constituido por bóveda y base craneal. Y **viscerocranium** que aloja las órbitas y el complejo nasomaxilar encargado de las funciones de la alimentación y de la respiración (Kuroe *et al.*, 2004; Martínez-Abadías *et al.*, 2009; Lieberman *et al.*, 2008) y está constituido por la mandíbula y los huesos faciales (Gadison, 2015). Estas unidades, a pesar tener diferentes orígenes tisulares embrionarios, están unidas por un desarrollo paralelo y cometidos funcionales interrelacionados. Estas estructuras están integradas por subunidades de menor tamaño y entidad que, a su vez, presentan integración funcional (Moss, 2007; Martínez-Abadías *et al.*, 2009). El desarrollo conjunto de estas unidades, independientes en principio, provoca un grado de integración funcional y estructural entre ellas [Martínez-Abadías *et al.*, 2012(b)] de modo que restricciones al crecimiento de la bóveda craneal pueden afectar indirectamente el crecimiento de otras áreas como la base craneal y la cara (Anton, 1989; Cheverud *et al.*, 1992; Pomeroy *et al.*, 2010).

La deformación de los cráneos que supone la distorsión dinámica de los vectores normales del crecimiento neuro-craneal infantil (Moss, 1958), puede ser provocada por causas naturales



(congénitas o sinostosis temprana) o por métodos artificiales con un patrón etnocultural (García-Hernández y Murphy-Echeverría, 2009). De este modo, el proceso de remodelado artificial de los cráneos desencadena una serie de relaciones dinámicas entre el estrés provocado por fuerzas de compresión extrínsecas y las fuerzas compensatorias intrínsecas, de las cuales la más relevante es el crecimiento del sistema nervioso central que altera y redirige la expansión craneal (Gadison, 2015).

6.2 CRECIMIENTO CRANEOFACIAL

La morfogénesis de los huesos de la bóveda craneal y complejo facial es un proceso que se inicia en la embriogénesis temprana y se completa en la vida adulta. En el ser humano, el final del crecimiento de la bóveda se produce por la consolidación de las suturas y la osificación de las fontanelas en la tercera década de vida. Ahora bien, el cierre completo de estas sindesmosis no se produce hasta la séptima u octava década de vida (Opperman, 2000). El basicranium, la estructura que tiene una osificación endocondral, en su mayor parte, es la región del cráneo que antes adquiere su forma adulta; esta maduración se produce antes que la bóveda y mucho antes que la cara (Enlow y Hans, 1996; Sperber, 2001). Es importante tener en cuenta que el origen embrionario inicial del cráneo es distinto en el polo rostral y en el polo caudal. El polo anterior de la base (las alas mayores y menores del esfenoides y el etmoides) así como la cara, el frontal y la escama del temporal tienen su origen en las células de las crestas neurales. El resto de la base (polo posterior), el occipital, los parietales y el peñasco del temporal provienen del mesodermo paraxial (Sadler, 2006). Estos factores de diferenciación celular, limitaciones genéticas y factores ambientales se irán alternando, en mayor o menor medida, para conducir al desarrollo final del cráneo (Ogura *et al.*, 2006; Gadison, 2015).

El cerebro crece rápidamente in útero y durante los primeros tres años de vida. Un niño nacido a término tiene ya cerca del 40% del volumen de su cerebro adulto y llegará al 80% a los tres años después del nacimiento. El cráneo del recién nacido presenta los huesos separados por bandas de tejido fibro-conectivo, suturas y fontanelas, donde se llevará a cabo un activo proceso de aposición ósea (Kabbani y Raghuvver, 2004). La bóveda y la base presentan el 90% de su crecimiento a los 6 años, mientras que las estructuras maxilares y mandibulares completan el 80% de su crecimiento a los 6 años (Enlow y Hans, 1996).

La bóveda craneal del neonato que, como hemos visto, no tiene toda ella el mismo origen embrionario, consta de cinco huesos planos: dos frontales, dos parietales y un occipital. A las paredes laterales contribuyen la escama del temporal, y el ala mayor del esfenoides (Morriss-Kay y Wilkie, 2005). Las suturas de la bóveda craneal, los tejidos fibrosos que unen los huesos del cráneo, desempeñan un papel muy relevante en el crecimiento, especialmente durante la

rápida expansión del neurocraneo y el desarrollo del complejo maxilar (Opperman, 2000; Morriss-Kay y Wilkie, 2005). Su desarrollo y crecimiento es controlado por un complejo sistema intercelular de señalización que gobierna las diferentes regiones y los límites de las suturas (Jiang *et al.*, 2002). Las suturas de la bóveda craneal son: sutura interfrontal (metópica), la sutura sagital entre los huesos parietales, las suturas coronales (dos) entre los dos frontales y los dos parietales, las suturas lambdoideas que son dos y están entre los huesos parietales y la escama del occipital y las suturas escamosas entre los huesos parietal, temporal y esfenoides (Opperman, 2000).

Como zonas activas de crecimiento, las suturas (aunque ya se verá hasta qué punto es admitido por todas las teorías de crecimiento craneofacial) precisan mantenerse con consistencia fibrosa para favorecer la aposición de hueso en los márgenes en el proceso de expansión de la bóveda. La obliteración (osificación) prematura de alguna de estas suturas (cranosinostosis), provoca el cierre temprano de los frentes de crecimiento óseo a lo largo de la sutura, impidiendo la formación de hueso. Produciéndose, en consecuencia, la incapacidad para acomodar regularmente el crecimiento expansivo del sistema nervioso central. Todo esto conlleva una morfogénesis anormal compensatoria de toda la cabeza que conduce a un dismorfosis craneofacial (Opperman, 2000). Curiosamente, estos sujetos con anomalías de desarrollo craneofacial presentan una alta integración en la base craneal, pero distorsión de la integración en cara y bóveda. Esta preservación de mínimos (protección de la base) parece ser un requisito para asegurar los espacios neurovasculares que garantizan la vida (Richtsmeier y DeLeon, 2009).

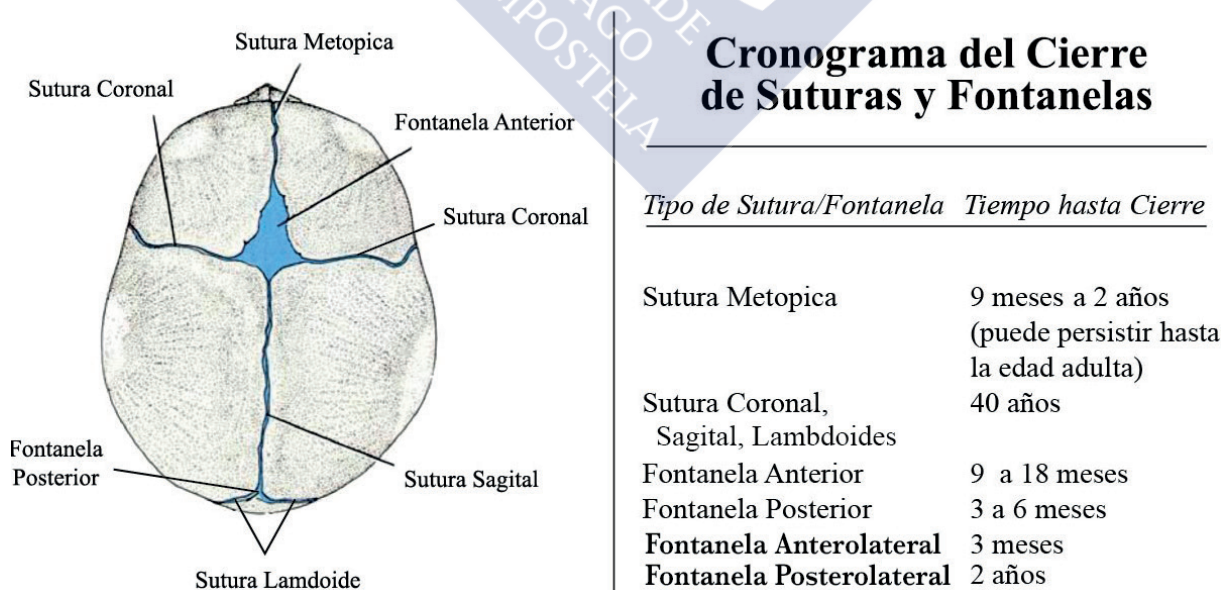


Fig.6.1-Adaptado de Kabbani y Raghuvver, 2004.

Entre el cerebro y los huesos craneales se disponen las meninges como cápsula envolvente, subdividida en tres capas: la *duramadre*, la *aracnoides* y la *piamadre*. La duramadre, está estrechamente relacionada con la capa endostal del periostio interno de los huesos craneales, que está surcada por los vasos sanguíneos regionales (Lewis, 2004); está firmemente adherida al endostio óseo en algunos puntos de la base craneal y de la bóveda, siendo especialmente relevantes las alas del esfenoides.

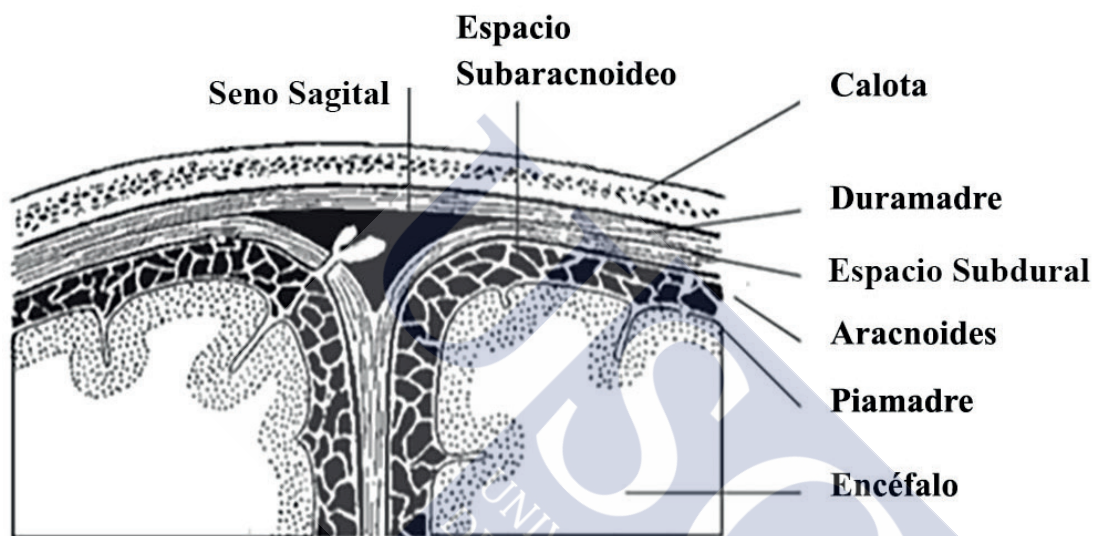


Fig.6.2-Sección coronal a través de las meninges. Modificado de Lewis, 2004.

La base craneal forma el piso de la bóveda craneal y se extiende desde el *foramen cecum*, anteriormente, hasta el hueso occipital posteriormente (Dhopatkar *et al.*,2002; Mangano y Mangano, 2010) y está compuesta por diferentes huesos (esfenoides, etmoides, frontal, temporal y occipital) interconectados por sincondrosis.

Debido a su interposición entre bóveda y viscerocráneo, hay casi unanimidad en la idea de que el basicranium desempeña un papel importante en el crecimiento general del cráneo, pudiendo funcionar como un estímulo o como un elemento neutralizador del crecimiento facial [Lieberman y McCarthy, 1999; Lieberman *et al.*, 2000, 2008; Hayashi, 2003; Bastir *et al.*, 2004; Bastir y Rosas, 2005, 2006; Hallgrímsson *et al.*,2007(a); Gkantidis y Halazonetis, 2011].

Aunque anatómicamente se ha dividido la base en fosa craneal anterior, fosa craneal media y fosa craneal posterior, en el ámbito de las mediciones cefalométricas, la base craneal puede ser dividida en base craneal anterior (S-Na, *sella-nasion*) y base craneal posterior (S-Ba o S-Ar *sella-basion* o *sella-articulare*) (Thiesen *et al.*,2013) siendo la silla turca el punto de bisagra de las dos porciones (Dhopatkar *et al.*,2002). El maxilar se une a la porción anterior que se

extiende desde la silla turca (S) a la sutura frontal nasal (Na). La mandíbula se une a la porción posterior extendiéndose desde la silla turca (S) al borde anterior del *foramen magnum*, definido como basion (Ba) (Andria *et al.*, 2004).

La zona medial y paramedial del basicranium (una región con forma ovalada en torno al cuerpo del esfenoides) culmina su crecimiento y maduración morfológica más rápidamente [(de los 7–de 8 años)] que las porciones anterior, posterior y lateral, presumiblemente, porque casi todos los nervios craneales y vasos principales (estructuras vitales) atraviesan la base craneal en esta región [Lieberman *et al.*, 2000 (b)]. La base craneal lateral (o suelo craneal lateral) lo hace cerca de los 11–12 años. Ambas estructuras alcanzan su forma adulta antes del neurocranium y la cara (15–16 años) (Bastir *et al.*, 2006; Bastir, 2008; Lieberman *et al.*, 2008; Gkantidis y Halazonetis, 2011; Wellens *et al.*, 2013).

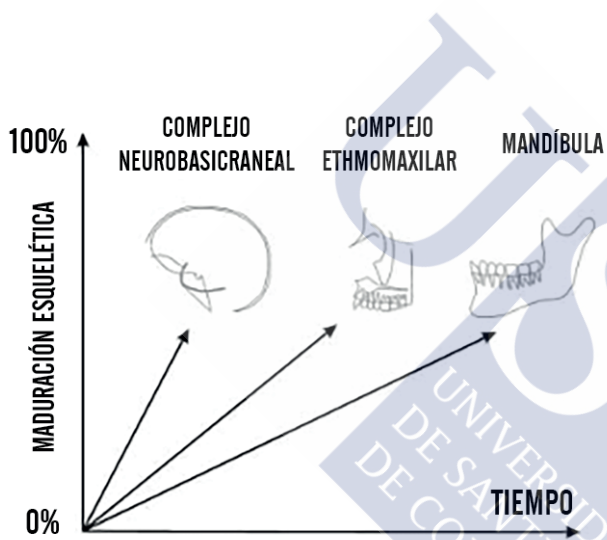


Fig.6.3-Niveles craneofaciales de desarrollo del cráneo. Modificado de Bastir, 2006.

El viscerocráneo está formado por los huesos de la cara y se origina principalmente a partir del cartílago de los dos primeros arcos branquiales de modo que el cartílago del primer arco branquial da origen al esqueleto facial y a la mandíbula, y el cartílago del segundo arco branquial –arco hioideo o cartílago de Reichert– da origen al estribo, la apófisis estiloides el hueso temporal y al hueso hioides. Si bien es importante recordar que el origen embrionario de todas estas estructuras está en las células de las crestas neurales (Sadler, 2006).

El cartílago secundario de la cabeza del cóndilo es relevante en el crecimiento de la mandíbula. El crecimiento en altura del cuerpo, en cambio, se lleva a cabo principalmente por aposición ósea a lo largo del borde alveolar subgingival. El crecimiento en anchura de la rama se da enteramente por procesos de aposición ósea en su borde posterior (Scott, 1953). La reabsorción simultánea en el reborde opuesto provoca el efecto de que al crecimiento en tamaño se suma la traslación o desplazamiento de las estructuras en la dirección de los vectores de crecimiento (Enlow y Hans, 1996). El crecimiento del cartílago permite el crecimiento del cóndilo hacia arriba y hacia atrás para mantener el contacto en la articulación temporo-mandibular mientras la mandíbula (en bloque) es desplazada hacia abajo y atrás por el crecimiento del esqueleto facial superior (Scott, 1953) y hacia delante y abajo por el crecimiento propio (Enlow y Hans, 1996).

6.3 PROCESO DE OSIFICACIÓN

La osificación del cráneo se produce mediante procesos de osificación desmal y endocondral. La base craneal tiene su origen en la osificación endocondral, el primordio cartilaginosa de huesos de la base, desarrolla los núcleos de osificación que darán origen a los diferentes huesos. Estos mantendrán entre ellos cartílagos de crecimiento que derivarán en las sincondrosis, últimas zonas de aposición ósea de la base craneal (Morriss-Kay y Wilkie, 2005). Una sincondrosis se define como el desarrollo de una unión entre dos huesos a través de un cartílago hialino o fibro-cartílago. Las sincondrosis son normalmente temporales y existen durante la fase de crecimiento hasta que el cartílago se reduce progresivamente durante la maduración esquelética llegando a la total obliteración por transformación en hueso antes de la vida adulta (Cendekiawan *et al.*,2010).

Por lo que se refiere a la bóveda (*calvaria*) se formará por condensación membranosa (Morriss-Kay y Wilkie, 2005; Singh *et al.*,2012) y su crecimiento se producirá por la aposición activa en las suturas (Sardi *et al.*,2007) pero también por un continuo proceso de aposición externa y reabsorción interna, que provoca otro desplazamiento gradual de las estructuras. Que el crecimiento se lleve solo a expensas de las suturas, o que las suturas sean el centro primario del crecimiento, parece de lo más cuestionable por una porción no desdeñable de autores. La aposición y el desplazamiento espacial favorecerán que la expansión del sistema nervioso central quede en todo momento recubierto por el neurocráneo (Opperman, 2000; Sperber, 2001).

El cerebro embrionario está rodeado por mesénquima compuesto por dos capas: la interna *endomeninx* y la externa *ectomeninx*. La parte interna de la *ectomeninx* no se osifica y forma la *duramadre*. Su porción externa presenta propiedades osteogénicas y condrogénicas que contribuyen a su diferenciación en hueso (Gadison, 2015). En la expansión del cerebro, el encéfalo en crecimiento es quien envía señales a la duramadre y por lo tanto, constituye la matriz funcional más importante de la bóveda (Enlow y Hans, 1996; Lieberman, 2011; Barbeito-Andrés *et al.*,2012). Se genera tensión a lo largo de la superficie endocraneal del neurocráneo, activándose así la aposición osteoblástica en el periostio intra-sutural y a lo largo de la parte exterior de la bóveda, en las porciones inferiores de la bóveda y base craneal. También se estimula el crecimiento endocondral dentro de las sincondrosis (Cendekiawan *et al.*,2010). Hay que decir que el papel de la duramadre es fundamental en el crecimiento de la bóveda, es decir que el crecimiento en las suturas es, en realidad, un efecto de la acción de la duramadre. En ausencia de duramadre, las suturas se obliteran y se cierra el crecimiento (Barbeito-Andrés *et al.*,2012).

El crecimiento del basicranium acontece principalmente a través de la osificación endocondral en las sincondrosis [Hallgrímsson *et al.*, 2007(a)]. Tres sincondrosis están presentes a lo

largo de la línea media de la base craneal: sincondrosis esfeno- etmoidal (SES), sincondrosis interesfenoide ou esfenoideal media, y la esfeno-occipital (SOS) o esfeno-basilar, para autores como Sardi *et al.*, (2008) y Cendekiawan *et al.*, (2010). El crecimiento del basicranium provoca un alargamiento craneo caudal y la flexión de las sincondrosis. Este desplazamiento se obtiene tras la actividad condrogénica-osteogénica diferencial en los márgenes superiores o inferiores de dichas bandas de aposición ósea (Lieberman y McCarthy, 1999; Wellens *et al.*, 2013). Por ello, estas sincondrosis son consideradas como importantes centros de crecimiento del esqueleto craneofacial, especialmente la sincondrosis esfeno-occipital debido a su tardía osificación y relevante contribución al crecimiento post-natal de la base craneal (Cendekiawan *et al.*, 2010). Su actividad cesa a la edad de 12 a 15 años y sus segmentos esfenoideos y occipitales comienzan a fusionarse. Algunos autores han descrito el cierre de dicha sincondrosis inmediatamente después de la pubertad (Sardi *et al.*, 2008). La sincondrosis esfeno-etmoidal se cierra a los 6 años de edad y la sincondrosis interesfenoide se osifica inmediatamente antes del nacimiento (Lieberman y McCarthy, 1999).

El basicranium medio crece principalmente a partir de la osificación endocondral de las sincondrosis. En contraste, el basicranium lateral, junto con la cara y el neurocraneo, crece a expensas de la osificación intramembranosa en las suturas y en la aposición de la matriz capsular. Estudios recientes han sugerido que la osificación endocondral parece estar menos influenciada por interacciones epigenéticas y por la interacción de matrices funcionales de órganos cercanos. La osificación intramembranosa, en cambio, se ve afectada por factores epigenéticos (Gkantidis y Halazonetis, 2011) y por el crecimiento de órganos adyacentes a través de fuerzas mecánicas que regulan los factores de transcripción en las suturas para inducir osteogénesis (Opperman, 2000; Gkantidis y Halazonetis, 2011) pero tanto las sincondrosis como las placas del crecimiento endocondral incorporan potenciales intrínsecos de crecimiento (Jeffery y Spoor, 2002). Sin embargo, tanto estudios en animales como en humanos sugieren que el crecimiento de la cara y, principalmente, el cerebro, influyen en el crecimiento endocondral de la base craneal (Gkantidis y Halazonetis, 2011), lo que respalda la hipótesis de que las variaciones en los patrones de crecimiento neural y facial provocan, por integración, notables influencias en la morfología craneofacial (Gkantidis y Halazonetis, 2011).

El crecimiento de la base parece seguir un comportamiento modular en las tres fosas craneales [Lieberman *et al.*, 2000 (b)]: la **fosa craneal posterior** también llamada fosa occipito-temporal, que alberga los lóbulos occipitales y el tronco del encéfalo (el cerebelo y el bulbo raquídeo), está limitada lateralmente por las porciones petrosa y mastoideas del hueso temporal y anteriormente por el *dorsum sellae*, aspecto posterior del cuerpo esfenoideal [Lieberman *et al.*, 2000 (b)].

La **fosa craneal media** en forma de mariposa. Cuyo límite anterior son las alas menores y el cuerpo esfenoidal y, el posterior, la parte petrosa del hueso temporal en su borde superior, junto al dorso de la silla turca. La base de la fosa está formada por el cuerpo y las alas mayores del esfenoides. Esta cavidad soporta los lóbulos temporales del encéfalo y la glándula hipófisis. Presenta una posición central en el cráneo, situándose detrás de las órbitas y del tercio medio facial, y estando anatómicamente relacionada con la rama mandibular externamente y con el área de flexión de la base craneal en la línea media (Lieberman *et al.*,2000, 2002; Bastir *et al.*,2004, 2006, 2008; Bastir y Rosas, 2005). Su desarrollo evolutivo en el *Homo sapiens sapiens* parece estar estrechamente relacionado con el desarrollo de los lóbulos frontales, los lóbulos temporales y con un incremento de la flexión de la base craneal y la retracción de la cara (Lieberman 2008).

Recientemente estudios de morfometría geométrica (Bastir *et al.*,2004, 2006; Bastir y Rosas, 2005) sugieren que los componentes basicraniales laterales, tanto de la fosa craneal anterior como de la media, están particularmente integrados con las estructuras faciales. Existe una fuerte relación entre la parte posterior del borde mandibular y la alineación horizontal de la fosa craneal media. Si se produce una rotación de la base craneal media hacia atrás, hacia una posición más horizontal, la parte posterior de rama mandibular sufre la misma rotación. Estos resultados sugieren que la parte petrosa de la fosa craneal media y la porción posterior de la rama mandibular se comportan como una unidad: petrosomandibular, verticalmente alineada y morfológicamente integrada (Bastir *et al.*,2004). Como ya había enunciado Scott (1967), muchos años antes, estas estructuras comparten un sentido de rotación común en una dirección postero-superior, juntamente con la base craneal pero en un grado considerablemente más acentuado (Bastir *et al.*,2004). En realidad esta interrelación estrecha en el crecimiento de la fosa craneal media

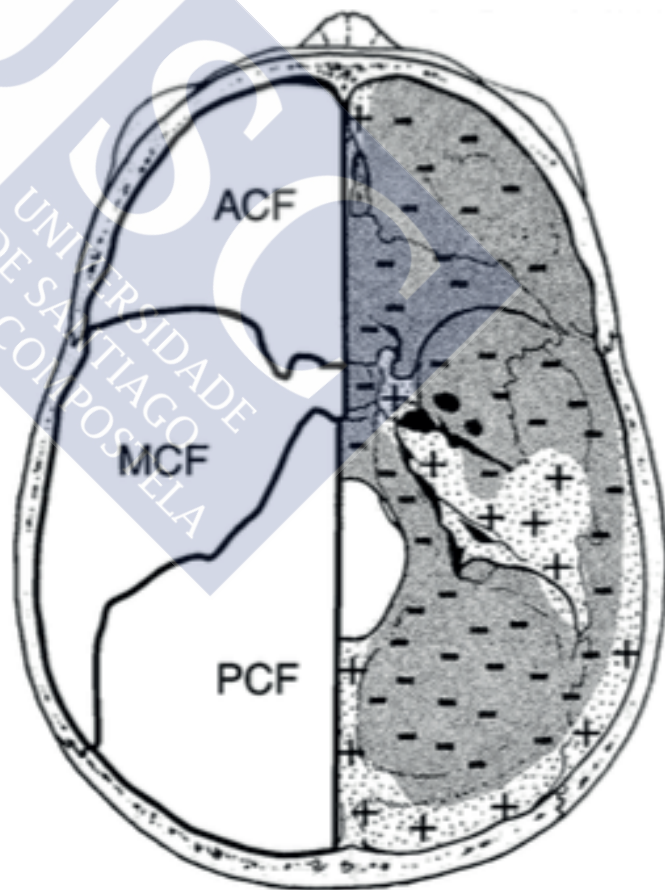


Fig.6.4-Vista superior de la base craneal humana. Izquierda: División entre Fosa craneal anterior (ACF), Fosa craneal media (MCF) y Fosa craneal posterior (PCF). Modificado de Lieberman, 2000.

con el complejo nasomaxilar ya había sido vislumbrado por Burdi en la década de los 70, quien sostuvo que cambios morfogénicos en la base craneal se extendían sin paliativos a estructuras circundantes.

La **fosa craneal anterior** alberga el lóbulo frontal y el bulbo olfatorio; está limitada posteriormente por el borde posterior de las alas menores del esfenoides o cresta esfenoidal [Lieberman *et al.*, 2000 (b)] y anteriormente por el ángulo que se forma entre la escama del frontal y la porción horizontal del hueso frontal y del etmoides. El desarrollo de la fosa craneal anterior está en estrecha relación con el desarrollo facial y con la posición antero-posterior del complejo nasomaxilar (Enlow y Hans, 1996).

Esta fosa concluye su desarrollo aproximadamente a los 5–6 años de edad, en el momento en que el desarrollo de los lóbulos frontales se estabiliza; guarda una relación estrecha con la sincondrosis esfeno-etmoidal y con la sutura fronto-esfenoidal (Bastir *et al.*, 2006). Tradicionalmente también se ha asumido una estrecha relación entre el desarrollo de esta fosa y el crecimiento del tabique nasal y de la órbita y por tanto con el desarrollo facial; se puede decir que es una unidad funcional similar a la descrita en la fosa craneal media (Sarnat, 1976).

El crecimiento craneofacial se explica, en realidad, en base a dos argumentos que son comunes a todos los procesos biológicos de crecimiento. Para un grupo de autores el elemento fundamental y directriz del crecimiento es la determinación genética. Para otros el crecimiento es fundamentalmente, en lo que se refiere a tamaño y posición, fruto en gran parte de la función a la que es sometida esta estructura.

El proceso de crecimiento en sí se produce por dos acciones: a) una acción local en la que el hueso y el cartílago modifican su tamaño y forma por la aposición superficial y remoción; y b) las unidades esqueléticas (huesos) presentan un desplazamiento relativo entre sí como resultado de la acción expansiva, el ‘empuje’ de la expansión intersticial de los tejidos cartilaginosos o suturales (Moss, 2007). En base a esto podemos afirmar que el desarrollo de las estructuras faciales se lleva a cabo, en un primer momento, por la osificación intramembranosa de las estructuras mesenquimales que estaban situadas en los arcos faríngeos, pero que el desarrollo y posterior función de las vías respiratorias, los dientes, y las cargas masticatorias es lo que finalmente configura de manera definitiva el tamaño y la estructura maxilofacial (Sardi *et al.*, 2007).

El tabique nasal cartilaginoso desempeña un papel preponderante en el desarrollo maxilofacial; según algunas teorías se propone como la estructura que lleva a cabo la fuerza principal en la morfogénesis del maxilar y en la estimulación huesos adyacentes (Scott, 1967), a pesar de que estas afirmaciones sobre la independencia del tabique nasal no son compartida por otros autores, como se expondrá más adelante. Lo que sí es un hecho es el desplazamiento conjunto



de la zona nasomaxilar. El crecimiento hacia adelante y hacia abajo de este tabique arrastra el maxilar con él (Enlow y Bang, 1965).

En un esquema muy breve se puede decir que el crecimiento craneofacial ocurre por la conjunción de tres hechos:

- 1- Crecimiento cartilaginoso en el septum nasal y crecimiento por osificación endocondral en la base del cráneo, en la unión esfeno-occipital, esfeno-etmoidal y pre-esfenoidal. También tiene crecimiento a partir de osificación de cartílago el cóndilo mandibular.
- 2- Crecimiento sutural.
- 3- Crecimiento continuo por modelado aposición-reabsorción en las superficies periostal y endostal (Sarnat, 1983).

6.4 TEORÍAS DE DESARROLLO CRANEOFACIAL

En el intrincado mundo de las teorías del crecimiento craneofacial se han ido desarrollando hipótesis sobre cómo se lleva a cabo este crecimiento, sobre cuál es el papel de cada una de las estructuras involucradas y sobre cuál es el rango de cada uno de los factores que intervienen a lo largo de la ontogénesis. En líneas generales se puede decir que hay dos teorías que destacan de entre las otras, son teorías que han suscitado una intensa polémica, que son fruto de un trabajo intenso a lo largo de la vida de los que las enunciaron y que, además, se puede decir que tienen el mérito de haber prevalecido en el tiempo. Se han mantenido como referencia y han logrado integrar y dar explicación a un *corpus* de conocimiento que se ha elaborado *a posteriori* en torno a la idea original; es decir, que siguen siendo un esquema que encierra aspectos muy intuitivos que facilitan el acercamiento al crecimiento craneofacial, especialmente a lo que ha podido ocurrir en el crecimiento craneofacial de estos cráneos modificados culturalmente. Estas dos teorías han quedado recogidas en dos análisis: el análisis funcional generado a partir de la teoría de la Matriz Funcional de Moss (1969) y el análisis de contrapartes de Enlow (1996).

Empezaremos por la teoría de la Matriz Funcional de Moss. Esta es una teoría que contiene un fuerte concepto filosófico, al que es fácil acceder de forma intuitiva pero que es difícil de demostrar en su totalidad. Los trabajos de Moss *et al.*, marcaron un antes y un después en el crecimiento craneofacial; su teoría en la que, como veremos, el hueso pasaba a tener un papel secundario en el crecimiento, provocó tanta polémica como sorpresa. Su gran problema ha sido que a pesar de ser un cuerpo teórico muy sugestivo y seguidor de la doctrina clásica de Claude Bernard de que la función crea el órgano, hay muchos aspectos que han sido difíciles de demostrar y su transcendencia al ámbito clínico ha sido bastante limitado. Ha quedado como

un cuerpo teórico muy atractivo para la antropología pero con escasa relevancia práctica en el mundo de la clínica y en su enfoque terapéutico (Corruccinni, 1999). La hipótesis de la matriz funcional ve el conjunto del cráneo como una serie de matrices funcionales que son cada una de ellas una cápsula expansiva en el proceso de crecimiento. Cada estructura funcional desarrolla una matriz. Cada función se realiza por un componente funcional que se constituye a partir de dos elementos: una *matriz funcional (cápsula matricial)* y una *unidad esquelética*. Todos los tejidos blandos, órganos y cavidades necesarios para llevar a cabo una función comprenden *la matriz funcional*. Es muy importante recalcar que los espacios vacíos imprescindibles para la vida, vías respiratorias por ejemplo, son espacios que responden al concepto de matriz funcional pues se expanden y cambian volumétricamente y de forma según las demandas fisiológicas y remodelan los tejidos duros que preservan estas vías. El segundo componente de la matriz funcional son las unidades esqueléticas, es decir, los tejidos duros (hueso y cartílago) que, con su maduración, o su crecimiento, tienen como cometido dar apoyo biomecánico y protección a la matriz funcional. Este es el fundamento inicial propuesto por Moss (1960) y que posteriormente ha sido continuado por otros autores (Barbeito-Andrés *et al.*, 2012). Un aspecto muy relevante de la teoría de la matriz funcional es el papel secundario del hueso y del cartílago; el hueso y el cartílago no son los elementos promotores del crecimiento, no es dónde radica el elemento director del desarrollo de determinadas estructuras, las unidades esqueléticas sólo son capaces de amoldarse al desarrollo que le impone la matriz funcional de tejidos blandos o de espacios vacíos. Otro de los aspectos fundamentales del planteamiento de Moss (1960) es que, además de la puesta en marcha del proceso inicial de desarrollo, la herencia y los genes no juegan un papel significativo en cuanto a lo que a la determinación del crecimiento se refiere, tanto de las estructuras esqueléticas en general como del esqueleto craneofacial en particular. Este es uno de los aspectos más polémicos de la teoría de la matriz funcional (Carlson, 1999). En realidad, qué es lo que provoca un desarrollo anómalo de una matriz funcional, la influencia epigenética de una función alterada, o es que la función alterada proviene, en realidad de un determinado patrón genético que impide un funcionamiento normal. En este segundo caso volveríamos a tener un determinismo genético, un condicionante superior que es imposible de eludir por mucho que se altere el entorno y las influencias epigenéticas. Una mandíbula pequeña estaría relacionada con una función de matriz inadecuada (deglución, masticación, respiración...) pero, en realidad, la duda queda sobre si en definitiva esa alteración de la función no se verá condicionada por patrones genéticos de carácter ontológico superior, por ejemplo, un determinado desarrollo del sistema inmune en el anillo de Waldeyer, una determinada tendencia postural, etc. que acaben condicionando el crecimiento (Johnston, 1976).

Es importante resaltar que para Moss (1997) el crecimiento y traslación del maxilar superior no radica directamente en los cartílagos de crecimiento del septo nasal, lo mismo que el desarrollo mandibular no radica en el cartílago de crecimiento del cóndilo. El crecimiento de ambas



estructuras y su desplazamiento depende directamente de la expansión y del desplazamiento de las estructuras capsulares en las que están inmersos. En definitiva, el esqueleto craneofacial es modelado, a través del tiempo, mediante el desarrollo de los órganos adyacentes y el hueso es epigenéticamente modificado por la matriz funcional asociada con el (Wellens *et al.*, 2013).

El término matriz funcional no coincide exactamente con lo que se conoce como “tejidos blandos” (músculos, glándulas, nervios, vasos sanguíneos, grasa, etc), aunque todos ellos se incluyen dentro de dicho concepto. La hipótesis de la matriz funcional distingue dos tipos de matrices funcionales: capsular –*capsular matrix*– y perióstica –*periosteal matrix*– [Moss, 1997 (a; b; c; d); Moss y Salentijn, 1969]. Desde el punto de vista de los procesos dinámicos del crecimiento, el crecimiento craneofacial es una combinación de la actividad de estos dos tipos de matrices funcionales. Las matrices capsulares son las responsables del crecimiento y del movimiento de traslación, es decir, de los cambios en la posición. Las matrices periósticas son responsables del crecimiento por transformación, es decir, de los cambios en el tamaño y la forma (Moss, 2007). El cráneo dispondría, además de una serie de matrices funcionales dependientes de funciones propias (como la órbita, la cavidad nasofaríngea, la cavidad bucal,...) de dos matrices capsulares. Una matriz capsular de la bóveda que se encargaría del desplazamiento y crecimiento expansivo de la bóveda y una matriz capsular facial que regiría el crecimiento y desplazamiento del viscerocráneo. Sobre la superficie del hueso actuarían las matrices periostales, que serían las encargadas de los procesos de remodelación por aposición ósea y por reabsorción. Lo que sí es fundamental entender es que para Moss, los cartílagos no son los elementos responsables directos de la expansión del cráneo. Es conocido el resultado descrito por Moss del crecimiento mandibular normal en una mandíbula que presentaba condilectomía bilateral y la preservación de la cápsula funcional. En el crecimiento de la bóveda craneal, para Moss, tendrá gran relevancia el papel de la expansión del sistema nervioso central y la acción de las meninges como elemento capsular que estimula el crecimiento de la calota. La hipótesis de la matriz funcional resalta la plasticidad durante el crecimiento y desarrollo craneofacial, la influencia de factores epigenéticos que son capaces de actuar sobre la dinámica de las diferentes matrices o sobre la interrelación que se establece entre las diferentes matrices funcionales que forman parte de otra matriz mayor. Introduce, por tanto, el concepto de que el cráneo está conformado por componentes que varían con relativa independencia entre sí (Barbeito-Andrés *et al.*, 2012).

La hipótesis de la matriz funcional (Moss, 1997 a,b,c,d) es una de las más importantes teorías para explicar el crecimiento craneofacial, sobre la base de interacciones entre tejidos adyacentes (Sardi y Rozzi, 2007). Por ello, como refieren Bastir y Rosas (2005), los volúmenes funcionales y las estructuras esqueléticas en la hipótesis de la matriz funcional (Moss, 1962) son un ejemplo de integración morfológica. Se ha criticado a Moss porque en sus primeros

planteamientos sobre la hipótesis funcional defendía la independencia de las matrices (Johnston 1976), la función podría llegar a hacer “independiente” a determinada matriz que compartía un espacio topográfico con otras matrices. Posteriores enunciados de la matriz funcional, han despejado esa duda, en realidad, la hipótesis de la matriz funcional es considerada, por la mayor parte de los autores como un enunciado integrador.

La teoría de la matriz funcional explica el concepto del desplazamiento espacial y los procesos de modelado óseo en la morfogénesis craneofacial. Podemos destacar por ello el concepto de rotación –*growth rotation*– en el crecimiento y el del desarrollo craneofacial introducido por Björk (1955). En sus trabajos, Björk, define tres formas de rotación: matricial, intramatricial y total .

La rotación matricial –*matrix rotation*– es la rotación de un hueso con su matriz o cápsula perióstica en su articulación, mientras que la rotación intramatricial –*intramatrix rotation*– es la rotación del hueso dentro de la matriz perióstica. La combinación de la rotación matricial y la intramatricial se conoce como rotación total.

La rotación total se denomina rotación verdadera de la mandíbula y se refiere a la rotación del cuerpo mandibular en relación a la base craneal anterior. La rotación matricial se denomina rotación aparente de la mandíbula y describe el cambio angular en el plano de la mandíbula en relación con la base craneal anterior como resultado de la rotación verdadera de la mandíbula y del proceso de modelado óseo en el borde inferior de la mandíbula que se llama remodelación angular (Wang *et al.*,2009).

La otra teoría de desarrollo craneofacial que presenta aspectos relevantes para el presente trabajo es el análisis de contrapartes de Enlow (Enlow *et al.*,1969; Enlow y Hans, 1996). Esta teoría puede ser considerada como un enunciado sobre la modularidad craneal. Los contrapartes son módulos estructurales adyacentes en los que se puede dividir el cráneo. Estos módulos se mantienen fuertemente integrados en su estructura interna y menos integrados entre ellos. Se sitúan tanto en sentido vertical como en sentido transversal (Wellens *et al.*,2013).

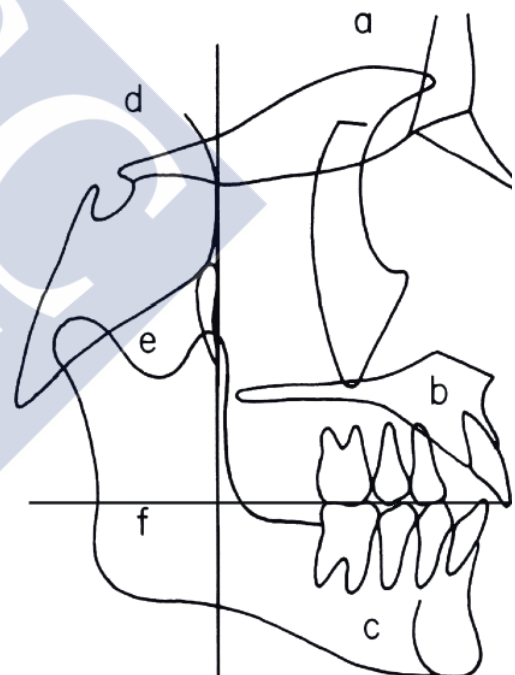


Fig.6.5-La línea vertical representa el plano Maxilar Posterior (PM); la línea horizontal representa el plano oclusal. Ambos sirven de frontera de partes-contrapartes. Por delante del plano PM (a) fosa craneal anterior, (b) maxilar y (c) cuerpo mandibular y por detrás del plano PM (d) fosa craneal media, (e) espacio faríngeo y (f) rama mandibular. Tomado de Enlow, 1982.

El análisis de contraparte (Enlow *et al.*, 1969) divide la cara en un módulo anterior y uno posterior, separados por el plano maxilar posterior (PM) sugiriendo una correspondencia espacial y contra-réplica entre las estructuras anatómicas separadas por el plano maxilar posterior (PM) (Bastir *et al.*, 2008). El plano maxilar posterior (PM) queda definido por el punto SE (punto correspondiente a la intersección de la gran asa del esfenoides con el suelo de la fosa craneal anterior) y por la fisura pterigo-maxilar. De forma más simple el plano maxilar posterior se define por el límite anterior de la fosa craneal media [punto esfenotmoideo (SE)] y la parte posterior de la tuberosidad del maxilar (Enlow *et al.*, 1969; McCarthy y Lieberman, 2001; Bastir, 2008). De acuerdo con el principio de la contraparte de Enlow, se mantiene que hay una correspondencia espacial entre las estructuras anatómicas separadas por el plano posterior maxilar (PM). De este modo, el crecimiento de una parte del esqueleto facial o del cráneo se relaciona específicamente con su contraparte estructural y geométrica de la cara y el cráneo (Martínez-Maza, 2008).

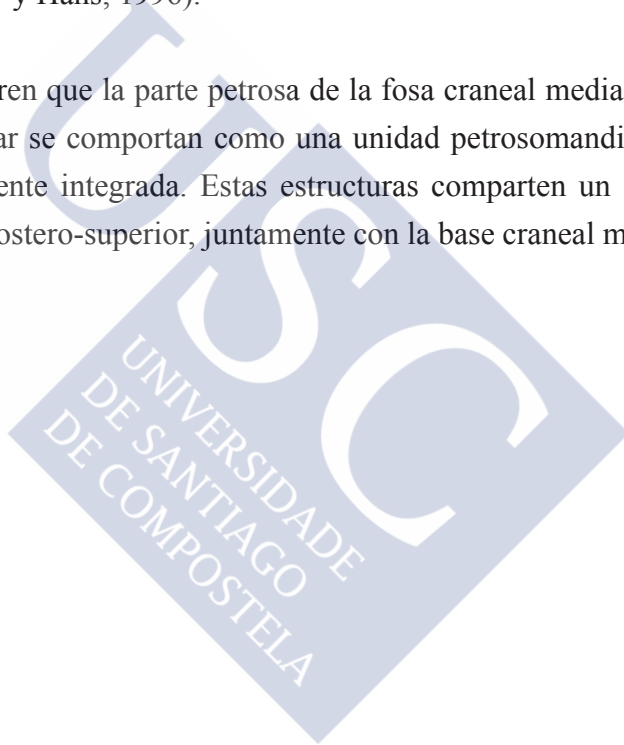
Uno de los grupos de división vertical está integrado por: los lóbulos frontales, la base craneal anterior, el complejo etmo-maxilar, el "bloque facial" (Lieberman *et al.*, 2000; McCarthy y Lieberman, 2001) y el corpus mandibular (Bastir *et al.*, 2008). El otro grupo se compone de los lóbulos temporales, la base posterior, la fosa craneal media y la rama mandibular (Bastir *et al.*, 2004, 2008). De este modo se establece un límite estructural de los elementos faciales por el desarrollo de la base craneal. La teoría de Enlow asume que la morfología del *basicranium* está moldeada por el desarrollo y evolución de los lóbulos del cerebro (Bastir, 2008). En sentido transversal, es importante tener en cuenta que el *basicranium* madura antes que las estructuras faciales, que tienen su desarrollo empleando el *basicráneo* como plano de crecimiento, es decir el desarrollo facial queda condicionado por su contraparte basi-craneal (Cheverud, 1996; Bastir, 2008).

Este análisis mantiene que los lóbulos frontales y los bulbos olfatorios del encéfalo modelan la fosa craneal anterior, y establecen, también, los límites espaciales de la cara anterior, en especial, del complejo etmo-maxilar. Este complejo estructural contiene, a su vez, cápsulas como los ojos, la cavidad nasal y el corpus mandibular, es decir la cámara anterior del espacio funcional oral. Estas estructuras, durante el crecimiento, muestran desarrollo integrado y forman lo que ha sido denominado "la columna craneofacial anterior" (Bastir, 2008). A su vez, los lóbulos del temporal modelan las porciones laterales de la fosa craneal media que se corresponde espacialmente con la dimensión antero-posterior de las estructuras faríngeas (espacios vacíos) y la anchura de la rama mandibular. Esto es lo que se denomina "columna craneofacial posterior" (Bastir, 2008).

El módulo anterior, conocido como el complejo nasomaxilar, se ha identificado como un bloque facial estrechamente integrado con las órbitas (Enlow *et al.*, 1969; McCarthy y Lieberman, 2001; Wellens *et al.*, 2013).

Con respecto a la rama mandibular, el análisis de contraparte identifica a la variación en la inclinación horizontal de la fosa craneal media como el principal factor asociado a la variación observada en la amplitud de la rama entre los humanos modernos (Enlow *et al.*, 1982; Bastir *et al.*, 2004). Existe una fuerte relación entre la parte posterior del borde mandibular y la alineación horizontal de la fosa craneal media. Si la base craneal media gira hacia atrás, hacia una posición más horizontal, la parte posterior de rama mandibular experimenta una rotación similar (Enlow *et al.*, 1982; Enlow y Hans, 1996).

Estos resultados sugieren que la parte petrosa de la fosa craneal media y la porción posterior de la rama mandibular se comportan como una unidad petrosomandibular verticalmente alineada y morfológicamente integrada. Estas estructuras comparten un sentido de rotación común en una dirección postero-superior, juntamente con la base craneal media craneal (Bastir *et al.*, 2004).









7. CRANEOMETRÍA DE CRÁNEOS DEFORMADOS Y ALTERACIONES MAXILARES.





A lo largo de estos últimos años, y, sobretodo, a partir de la introducción de la hipótesis de la Matriz Funcional, han sido varios los autores que se han acercado al curioso fenómeno de los cráneos deformados. La posibilidad de que el crecimiento se pueda ver modulado, de forma muy significativa e irreversible, por agentes externos, despertó un interés significativo por el estudio de estos cráneos. Estas modificaciones de la forma craneal son, en realidad, una muestra de hasta qué punto la acción externa de una serie de condicionantes mecánicos se superpone a un patrón de crecimiento y desarrollo liderado por un genotipo que es el resultado, a su vez, de un proceso de evolución de millones de años. En la deformación craneal toma sentido la teoría del “entorno epigenético” (*epigenetic landscape*) introducido por Waddington (1962), en el que la totipotencialidad de una serie de células o de tejidos se pierde en el momento en que siguen una determinada vía de diferenciación; este camino se ve condicionado por factores externos que inducen a ese grupo de células o tejidos, que conforman una unidad funcional, a seguir una determinada vía de desarrollo. Estos factores, independientes de las directrices genéticas propias de cada tejido, son los factores epigenéticos.

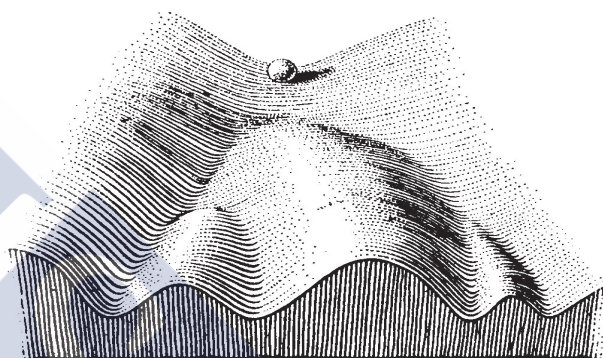


Fig.7.1- Esquema entorno epigenético.
(Waddington, 1962)

Estos cráneos posibilitan el estudio de aspectos muy relevantes en el desarrollo craneofacial; por ejemplo, hasta qué punto el desarrollo normal del individuo y el patrón predefinido de crecimiento puede sobreponerse o compensar de alguna manera la influencia de los elementos deformadores de origen externo. Cómo la función de una serie de matrices funcionales puede reubicarse en este entorno de crecimiento modificado y también hasta qué punto esta interacción externa puede modificar el conjunto de covarianzas entre diferentes estructuras que están sometidas a un patrón previamente establecido en el crecimiento craneofacial. Es cierto que en estos cráneos no vamos a poder valorar el crecimiento de una manera longitudinal, pero su estudio morfométrico nos permite acercarnos, de manera transversal, a lo que ha ocurrido durante el periodo de desarrollo, pues veremos el resultado final y podremos valorar en qué sentido, estructuras no involucradas de manera directa en los elementos deformadores pueden verse afectadas o no por el condicionamiento del desarrollo o, lo que es más interesante, hasta qué punto la acción de la deformación puede alterar el mosaico de integración que caracteriza al desarrollo de estructuras tan complejas. No son muchos los estudios que se han llevado a cabo para analizar la influencia que pueda tener la deformación intencional de la bóveda craneal en el desarrollo morfológico del complejo estomatognático. Estos cráneos son, en definitiva, una ma-

nifestación de hasta qué punto el cambio agresivo hacia un entorno epigenético extremo puede llegar a alterar radicalmente el desarrollo óseo, en definitiva, como bien dice Corruccini (1999), un aspecto curiosamente bastante olvidado en el bagaje diagnóstico y la concepción terapéutica de la mayoría de los clínicos contemporáneos.

A pesar de lo interesante que es la expectativa del estudio de este tipo de cráneos, no han sido muchos los estudios que se han dirigido a ellos. Pocos autores han deparado en este “experimento inopinado”, como ha sido definido por alguno de los autores que se han acercado al tema (Cheverud *et al.*, 1992)¹; las razones hemos de buscarlas en varios factores, la gran variedad de las muestras, su aparente heterogeneidad, y las muchas dudas que aún quedan sobre este proceso. Se puede decir que no ha habido un abordaje sistemático que haya permitido llegar a una conclusión definitiva de en qué medida esta deformación, en principio de la bóveda craneal, puede afectar a otras estructuras vecinas, en realidad, qué es lo que ocurre con el aparato masticatorio, que se desarrolla a partir del otro polo de la base craneal, en estos sujetos que han sido sometidos en su tierna infancia a una intensa deformación de los huesos que componen la bóveda craneal.

A mediados del siglo XX, se llevaron a cabo estudios encaminados a clasificar los diferentes tipos de deformaciones y a intentar analizar hasta que punto se podía considerar una determinada deformación como característica de determinada sociedad o cultura, o incluso como propia de determinada edad o periodo cultural del Perú antiguo; los estudios de Dingwal (1931) han marcado un hito en el ámbito de las deformaciones craneales, pero los estudios sobre las implicaciones que esta deformación pudo haber producido en la disposición del complejo maxilar y de la mandíbula no fueron más que puntuales y aislados. Las razones de que esto haya ocurrido son varias, por un lado hay que tener en cuenta que este material se halla disperso y suele ser de no fácil acceso. Por otro lado, la falta de difusión que han tenido estas prácticas no ya en el mundo de la estomatología, en el que se puede decir que es prácticamente desconocido, sino en el ámbito de las ciencias de la vida en general, ha sido el otro aspecto que ha limitado su estudio.

Los primeros trabajos sistemáticos referentes a estos cráneos, como ya se ha comentado en la revisión histórica sobre deformación, fueron llevados a cabo, dentro del ámbito de la antropología. Es muy ilustrativo el hecho que dentro del sorprendente trabajo monográfico llevado a cabo por Reiss y Stübel (1880-1887)², sobre el material de las excavaciones realizadas por ellos en Ancón, hay un capítulo en el último tomo de la monografía, que trata de un estudio

1 Los autores emplean el término natural experiment que se puede traducir, de modo un poco libre, por experimento inopinado. Cf. Cheverud J.M, Kohn L.A.P., Konigsberg L.W. y Leigh S.R. Effects of fronto-occipital artificial cranial vault modification on the cranial base and face. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1992; 88:323-345.

2 Virchow R. Skulls. En: Reiss W. y Stübel A. (1880-1887). *The Necropolis of Ancon in Peru. A contribution to our knowledge of the culture and industries of the Empire of the Incas.* Third volume. A. Asher & Co. Berlin. pág. 131-139.

antropológico de cráneos deformados y aparentemente no deformados realizado por Virchow, sobre las momias halladas en los fardos de enterramiento. Son sorprendentes tanto el texto, en el que el ilustre profesor lleva a cabo una morfometría clásica, como la calidad de las ilustraciones, que en la impresión original son una serie de litografías, a tamaño natural, de los cráneos estudiados. Hay que decir que este interés de Rudolf Virchow por la deformación craneal no es puntual, en su ingente actividad enciclopédica, se sintió también atraído por estos cráneos, pues en otra publicación procedió al estudio de las suturas y de la alteración de los osteomas



Fig.7.2-Litografía de cráneo Ancon, proveniente de Rudolf Virchow en Reiss y Stübel (1880-1887).

en el hueso temporal asociados a algunos de estos individuos (Virchow, 1896)³. También otro gran anatomista del XIX como Broca (1861,1875), como complemento a sus estudios sobre las áreas corticales, estudió de forma preliminar la disposición del cerebro en el interior de estos cráneos, discutiendo la posible alteración del encéfalo por la presión y el desplazamiento y traslocación de algunas áreas corticales a consecuencia del proceso deformador y del crecimiento compensador.

McGibbon inició en el mundo anglosajón los estudios sobre el temporal en los cráneos de-

³ Virchow R. Defecte des os tympanicum an künstlich deformirten Schändeln von Peruanen. Verhandlungen der Berliner Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte. 1896:69-74. Los cráneos con osteomas del conducto auditivo externo probablemente han pertenecido a pescadores y nadadores que realizan largas inmersiones en el agua y que acaban desarrollando estas lesiones. Para algunos autores habla esto a favor de un tipo de deformaciones específicas de gremios en las civilizaciones costeras. Cf: Dembo e Imbelloni pág. 327. Weiss P. (1961), describe una serie de momias provenientes de Cerro Colorado en las que los osteomas y la deformación de la bóveda, están asociados a un tipo de peinado y a un atuendo determinado.

formados. Su contribución más relevante fue el primer intento de clasificación de estos cráneos, intentando con una clasificación sencilla, hacer una división morfológica: dividió los cráneos deformados en dos tipos, unos en los que la deformación se obtenía tras la restricción antero-posterior y otros en los que se procedía a aplicar un elemento que provocaba una restricción circunferencial. En esta clasificación no se tenía en cuenta la relevancia que pudieran tener las variaciones étnicas dentro de estos dos grupos. Para McGibbon (1865), la deformidad de la bóveda no influía en las relaciones que se establecían a partir del basicráneo con el viscerocráneo, sin embargo, este trabajo se centró fundamentalmente en la clasificación y la descripción de los cráneos deformados más que en una interpretación de lo que la deformación representaba para el desarrollo del cráneo⁴.

Oetteking (1924), procedió a realizar estudios para averiguar si la conformación angular de la base del cráneo se correlacionaba con un tipo de morfología determinada de bóveda craneal, especialmente en estas muestras de cráneos deformados artificialmente. Llegó a la conclusión de que el grado de deformación de la base sí guarda relación con el tipo de deformación de la bóveda; también estableció de manera precisa que la posición del ophistion experimentaba un desplazamiento hacia arriba en los cráneos deformados. Los cráneos comparados en este trabajo, provienen de tribus del norte (Chinook, deformación tipo en cuña) y del sur de la costa oeste de los Estados Unidos (San Miguel, no deformados). Las conclusiones de este trabajo, a pesar de los años transcurridos, siguen teniendo un gran valor; la muestra fue constituida por un grupo de cráneos provenientes de la conocida como expedición de Franz Boas, en la que Oetteking (1930) había participado activamente y había llevado a cabo un pormenorizado estudio antropológico sobre varias poblaciones indias. En este estudio preliminar, ambos autores, realizaron un trabajo descriptivo de varios tipos de cráneos deformados sin hacer estudios comparativos. La precisión en la descripción de los puntos craneométricos, la magnitud de los datos recogidos y la calidad de sus ilustraciones, hacen que sea un documento de gran valor, y que siga siendo punto de referencia obligado.

Otro de los estudios señeros en este ámbito de los cráneos deformados es el trabajo llevado a cabo por Melvin Moss (1958). Su publicación, constituye posiblemente uno de los artículos más originales y con mayor proporción de contenido de teoría de crecimiento craneofacial que se han escrito sobre este tema. Moss (1958), haciendo uso de sus amplísimos conocimientos tanto embriológicos como de ontogenia funcional, procede a discutir el resultado observado en los cráneos deformados artificialmente aplicando a ellos su teoría de la matriz funcional. Moss lle-

⁴ Gibbon W. M. Artificially deformed skulls with special reference to the temporal bone and its tympanic portion. *The Laryngoscope*, 1912; 22: 1165–1181. Es cierto que Ferdinand Delisle en su tesis doctoral ya había realizado una clasificación de deformaciones que resulta menos simplificada desde el punto de vista funcional. Cf: Delisle F. *Contribution à l'étude des déformations artificielles du crâne. Thèse pur le doctorat en médecine*; Paris, 1880. Citado por Dembo A e Imbelloni J. *Deformaciones intencionales del cuerpo humano de carácter étnico*. José Anesi. 1938. pág. 234.

ga a la conclusión de que la deformación que se produce en la base del cráneo está directamente asociada al tipo de deformación que se aplica al cráneo. A pesar de que la exposición y razonamiento son brillantes, así como todo el cuerpo doctrinal que arroja al artículo, el punto débil de la publicación es la selección de la muestra y del grupo control. Es una muestra heterogénea en su procedencia. Los cráneos que han sido sometidos a una deformación antero-posterior presentan cifosis del ángulo de la base craneal, elevación de la cresta petrosa del temporal y rotación ventral del plano del *foramen magnum*, mientras que los cráneos que han sido deformados circunferencialmente presentan platibasia, depresión de la cresta petrosa y rotación dorsal del plano del *foramen magnum*.

Unos pocos años más tarde Björk y Björk (1964), dada su curiosidad por el valor epigenético de estos cráneos y su amistad con Pedro Weiss, procedieron a estudiar cráneos peruanos con deformación circunferencial y antero-posterior. Su publicación define una serie de medidas a partir de puntos craneométricos que determinan de manera sintética la magnitud de la deformación craneofacial. El artículo se basa en mediciones craneométricas en una muestra rica en deformaciones asimétricas y decide prescindir de la cefalometría lateral sobre film de rayos X. El problema es que la muestra vuelve a ser poco fiable, no queda clara la proveniencia de la mayoría de los cráneos, la ausencia de mandíbula en la práctica totalidad de los especímenes en algunos grupos debilita la fuerza de los resultados, y el grupo control no es un grupo homogéneo. Pero tiene grandes aspectos positivos: además de un conocimiento sobresaliente del crecimiento craneofacial, en la filosofía del trabajo subyace la idea de que la función es muy relevante a la hora del desarrollo morfológico. La idea sobre la que se configura todo el artículo es que la función es capaz de desarrollar un crecimiento compensador de aquellas estructuras que resultan seriamente afectadas por el aparato deformador. Es el primer artículo en el que se intenta relacionar la deformidad craneal con la morfología de maxilar y mandíbula; el pequeño número de especímenes en cada grupo, la ausencia de cráneos completos y la falta de atención a los aspectos dentarios y de las arcadas limitan los resultados, pero el artículo es relevante, en especial, como estudio sobre la posibilidad del desarrollo simétrico ligado a la función masticatoria. Este artículo y el de Moss (1958) forman parte de una misma tendencia doctrinal, en lo que al desarrollo craneofacial se refiere, y, años más tarde, serán analizados y estudiados con detalle por Frankel y Frankel (1989) en la introducción de su libro sobre su modulador funcional. Ellos procedieron a completar la información vertida en los artículos con numerosas comunicaciones personales de los autores citados (Moss y Björk y Björk). Frankel y Frankel (1989), emplearán esta información para dar argumentos a una teoría funcional sobre el proceso de crecimiento de estos cráneos y su posible aplicación a los cráneos que crecen sin ningún tipo de modulación, procediendo a trasladar esas conclusiones a aquellos en los que el modulador es empleado para modificar terapéuticamente el crecimiento.

Un año más tarde que el trabajo de Björk, se publica un trabajo en el que McNeill y Newton (1965), vuelven a realizar otro estudio sobre aspectos ya abordados por Moss; su estudio se lleva a cabo a partir de cráneos deformados de la costa noroeste de Norteamérica. Hay que decir que aunque hacen dos grupos de deformación: circunferencial y antero-posterior, el tipo de deformación antero-posterior tiene poco que ver en la morfología de la bóveda con la deformación antero-posterior de la costa del Perú (sobre la que se centra nuestro trabajo), la de McNeill y Newton (1965), es una deformación cuneiforme por cuna, típica de los indios de la zona de Vancouver y del estado de Washington, y, como ya se ha comentado, muy diferente a la hallada en la zona media de la costa del Perú. El estudio se centra en varios análisis cefalométricos sobre radiografías laterales y de base del cráneo. Los autores hallan platibasia tanto en la deformación circunferencial como en la antero-posterior, siendo este resultado distinto al hallado por Moss (1958), hay que decir que probablemente sea debido a la diferencia que hay entre las bóvedas de los cráneos estudiados en cada trabajo. Moss (1958), estudia cráneos con deformación antero-posterior sin bóveda en cuña a diferencia de estos autores. Hallan también rotación dorsal del plano del *foramen magnum* en los cráneos con deformación circunferencial y rotación ventral del plano en los cráneos con deformación antero-posterior, y, aunque los autores no lo consideran relevante, hallan un aumento de la anchura de la base craneal en la deformación antero-posterior y una disminución no significativa en la deformación circunferencial. Para los autores es muy relevante que en los cráneos deformados se produce una elevación, respecto a las estructuras centrales de la fosa craneal media, de las estructuras periféricas como la órbita y la cresta del peñasco del temporal. Los autores llegan a la conclusión que la deformación circunferencial conlleva una mayor alteración de la base craneal pero que no se puede concluir que una determinada deformación de la bóveda se asocie con una deformación basicraneal determinada. Esta es una conclusión que se manifiesta, en contra directamente de lo expuesto por Moss (1958) pero que, a la luz de los datos expuestos en el propio trabajo, en concreto, la rotación dorsal de los ángulos *nasion-basion-opistion* y *opistion-basion-sella* en los deformados circunferenciales, parece excesiva sino injustificada. Otros puntos débiles del estudio son lo pequeñas que son las muestras (grupos de 17-30 cráneos), su posible heterogeneidad, la ausencia de mandíbulas y la falta de datos sobre el complejo nasomaxilar en relación a la deformación de la bóveda.

Delaire y Billet (1964), realizaron un estudio sobre cráneos deformados peruanos. Los autores emplearon una pequeña colección de cráneos del Musée de l'Homme, con diferentes tipos de deformaciones (antero-posteriores y circunferenciales, en su mayoría) para demostrar el acierto de los enunciados ortopédicos de Chateau, quien sostenía que la plasticidad de los maxilares al tratamiento ortopédico no tiene prácticamente límites genéticos y que “lo que los incas habían logrado hacer con la bóveda craneal podía hacerse realidad en el viscerocráneo” (Chateau,

1956). El artículo de estos autores, aunque no deja de ser un artículo meramente descriptivo con un escaso número de cráneos, reincide en una serie de aspectos que ya habían sido enunciados por otros autores: la limitación al crecimiento en aquellas suturas que reciben la presión del aparato deformador provoca que el encéfalo estimule el desarrollo de aquellas zonas libres de la constricción (Delaire y Billet, 1964). En definitiva se vuelve a enunciar el principio de que el deformador redirecciona al vector de crecimiento craneofacial como ya había expuesto Moss (1958).

Posteriormente Bolender *et al.*, 1978 llevaron a cabo un estudio cefalométrico y craneométrico de un total de 56 cráneos deformados peruanos provenientes de la zona de Ica-Nazca-Paracas; los autores seleccionaron un grupo de cráneos con diferentes tipos de deformaciones, (circunferenciales, bilobares y anteroposterior) y como grupo control pobladores actuales de la zona estudiada. Encontraron platibasia en los cráneos deformados, un incremento de la medida *basion-bregma*, y un avance del perfil facial (protrusión bimaxilar), concluyendo que se producen alteraciones en el viscerocráneo cuando se altera el neurocráneo. El problema que presenta este trabajo es que no hay una separación neta entre los cráneos con deformación antero-posterior y circunferencial, pues todos ellos están incluidos en el mismo grupo. Al haberse publicado en francés su difusión e influencia sobre el resto de publicaciones ha sido limitada.

En la década de los setenta hay una serie de trabajos sobre deformación craneal que estudian el posible incremento de número de huesos wormianos en las suturas de estos cráneos. Es un tema polémico, pues encara el debate de la dominancia de la epigénesis sobre la genética en la ontogénesis. Ya en tiempos de Virchow, el hueso wormiano de la sutura lamboidea se había descrito como *os incae* dada la frecuencia con que aparecía en dichos cráneos. A favor de la preponderancia epigénesis estarían los autores que sostienen que los huesos wormianos no son un carácter heredado sino que son algo inherente a factores externos que condicionan el desarrollo de las suturas craneales. Bennett (1965), había propuesto que el desarrollo de suturas supernumerarias y huesos wormianos en la bóveda craneal era un factor totalmente independiente del genotipo del individuo y que eran inducidos por un estrés local en dichas suturas, por ejemplo por la acción de elementos deformadores. Bennett (1965), concluye en su estudio que hay una asociación entre el número de huesos wormianos y el acortamiento de la longitud basi-occipital. Estos hallazgos supusieron un refuerzo para el epigenetismo habiendo sido asumido como un hecho por otros autores⁵. Simultáneamente, se llevaron a cabo estudios experimentales en animales a los que se les provocó una deformación craneal intencionada. No llegaron a ser del todo concluyentes, pero en uno de los experimentos la compresión fronto-occipital produjo un

5 Berry A.C. y Berry R.J. Epigenetic variation in the human cranium. *J. Anat.* 1967;101:361-379. Moss M. L. Twenty years of functional cranial analysis. *American Journal of Orthodontics.* 1972; 61(5): 479-485.



aumento de huesos suturales tanto en las suturas anteriores como en las suturas posteriores (Pucciarelli, 1974). Un estudio realizado por El-Najjar y Dawson, (1977) sobre cráneos de indios Pueblo, sembró más dudas referente a estas aseveraciones en contra de las tesis epigenetistas y mostró que, en todo caso, el estrés comunicado a la sutura por la deformación provocaba un aumento en el número de huesos wormianos pero que no estaba directamente relacionada con su aparición; los sujetos que desarrollan los huesos wormianos, según estos autores, son aquellos que son capaces por un genotipo determinado de dar esa respuesta frente a un estímulo exógeno, pero precisan esa base genética previa para que los huesos wormianos se mantengan en el tiempo. Parte del estudio se centraba en la presencia de huesos wormianos en la sutura lambdoidea del feto. En puridad, no se puede decir que el trabajo de El-Najjar y Dawson cuestione en su raíz la doctrina epigenetista, más bien, la matiza y establece el principio de interacción entre lo heredado y lo condicionado por el medio. A este trabajo le siguieron otros sobre el desarrollo de estos centros de osificación secundarios. Al año siguiente, Gottlieb (1978) publicó un estudio sobre las suturas de cráneos deformados llegando a la conclusión de que los aparatos deformadores están directamente relacionados con el aumento de huesos suturales. Posteriormente Anton *et al.*, (1992) desarrollaron la hipótesis de que los huesos wormianos están en relación sólo con un tipo de presión determinada; la presión excesiva provoca la inhibición en la formación de huesos supernumerarios, la tensión, más que la presión, es la que está asociada a la aparición de estos huesos. Otros autores observaron que las suturas coronales al ser inmovilizadas presentan mayor cantidad de huesos suturales (Burrows *et al.*, 1997). Recientemente O'Loughlin (2004), ha vuelto a estudiar este tema llegando a la conclusión de que la presencia de los huesos wormianos tiene relación directa con factores epigenéticos y que su número probablemente aumente con un incremento de tensión en la sutura craneal en la que se forman y con una redirección del vector de crecimiento como había apuntado Moss (1958), si bien esto sólo podrá verificarse en el momento en que se tengan más datos sobre el desarrollo craneal intrauterino. Otro trabajo reciente en el que se estudian caracteres craneales no métricos en cráneos deformados es el llevado a cabo por Del Papa y Pérez (2007), que realizaron un estudio sobre una numerosa muestra de cráneos provenientes de distintas zonas de excavación en Argentina (Valle Calchaquí en el norte, próximo a la frontera con Bolivia, hasta el Valle del río Chubut en el noreste de la Patagonia). El estudio tiene de novedoso que el grado de deformidad fue analizado y clasificado empleando morfometría geométrica. La conclusión es que los huesos wormianos están correlacionados e influenciados por procesos ambientales como la deformación craneal; la deformación craneal, por tanto, puede alterar los caracteres no métricos craneales, debiendo ser tomados éstos con cierta reserva como elementos para el estudio de relaciones y patrones evolutivos.

Schendel *et al.*, (1980) llevaron a cabo un estudio sobre cráneos deformados (hawaianos), estos cráneos presentan un grado de deformación antero-posterior no tan acentuada como los

cráneos peruanos. Estos autores consideran que la hipótesis de la matriz funcional puede aplicarse a los resultados obtenidos. Las fuerzas externas que se aplican al neurocráneo provocan un cambio que se propaga a la totalidad de la estructura craneofacial debido a un cambio en la dirección de los vectores de crecimiento. En este trabajo tiene especial relevancia la alteración de la estructura maxilar. No se encuentran diferencias significativas en la deflexión basicraneal entre los cráneos deformados y los no deformados. Pero se hallan alteraciones en la posición mandibular en los cráneos deformados con una post-rotación, con aumento de la altura facial inferior que no parece afectar la protrusión de las arcadas dentarias.

Como complemento a estos artículos surge otro trabajo singular, es un trabajo que pretende establecer un método sistemático para el estudio de éste tipo de cráneos empleando radiografías tele-lateral de cráneo. Vuelve a presentar el problema de que se excluyen las mandíbulas del estudio y su relación con la base craneal debido a que los cráneos estudiados son cráneos provenientes de las excavaciones llevadas a cabo por Max Uhle a finales del siglo XIX en Perú y hoy en día conservados en el Lowie Museum of Anthropology de la Universidad de California Berkeley. Es un estudio llevado a cabo íntegramente con cráneos peruanos y que provienen de zonas costeras muy próximas a los empleados en el presente estudio y que la autora pone especial énfasis en lo relevante que resulta la selección cuidada de la muestra que ella identifica como el problema más relevante de los estudios previos, en concreto el de Moss (1958). También presta especial atención al tamaño de la muestra estudiando un total de 130 cráneos de los cuales tienen deformación antero-posterior 55, circunferencial 30 y son grupo control 45. El tamaño es excelente, pero la lástima es que el estudio al carecer de estructuras maxilares bien conservadas se centra en el estudio de la base craneal y de su relación con la bóveda deformada. También la clasificación que lleva a cabo de las deformaciones craneales y culturas, si bien es el empleado en la colección a la que pertenecen los cráneos (Menzel, 1977), no tiene mucha sintonía con los estudios de Weiss⁶ y Tello⁷. Anton (1989), encuentra un incremento neto de la anchura de la base craneal en los cráneos con deformación antero-posterior con una deformación proporcional del *foramen magnum*. También encuentra platibasia en los cráneos deformados y atribuye a un problema de clasificación de Moss (1958), la falta de coincidencia con sus resultados (comunicación personal de Moss a la autora). La posición de las estructuras periféricas como el maxilar no se alteran según esta autora en los cráneos deformados, para ella hay independencia entre la placa de desarrollo neurocraneal y la placa de desarrollo viscerocraneal, viéndose ésta última afectada solamente por el desplazamiento espacial de las estructuras de la base del cráneo, pero

6 Weiss P. Tipología de las deformaciones cefálicas de los antiguos peruanos, según la osteología cultural. 1962. Revista del Museo Nacional, Lima, Perú, Tomo XXXI, 15-42. Weiss P. Osteología Cultural. 2do. Libro. Prácticas Cefálicas: a) Deformaciones Intencionales de la Cabeza. b) Paleopatología. 2014, March. In Anales de la Facultad de Medicina 2014, March. 44; 2: 133-276.

7 Tello J. C. y Xesspe T. M. Paracas II parte, cavernas y necrópolis. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, 1979. Tello J.C. Paracas I. The Institute of Andean Research. T. Scheuch. Lima. 1959.



sin alteración intrínseca ni dimensional del propio complejo naso-maxilar.

El grupo de investigación liderado por Cheverud es autor de algunas de las más relevantes referencias sobre la deformación craneal intencional y su repercusión en el resto de estructuras del cráneo. Han llevado a cabo un estudio muy completo en el que han empleado análisis de elementos finitos. Su estudio considera que todos los trabajos llevados a cabo sobre deformación craneal hasta el momento no son concluyentes y, aunque parece haber evidencias de una serie de procesos que se desencadenan a consecuencia de la deformación de la bóveda craneal, la confusión en los datos aportados hasta el momento, consideran que, a la luz de los trabajos precedentes, la deformación de la bóveda sí parece tener algún efecto en la base craneal y en las estructuras faciales, pero, la heterogeneidad de las muestras y de los grupos de control hace que los datos que se han referido anteriormente queden todos ellos en tela de juicio. En sus artículos muestran un agudo criticismo hacia los trabajos revisados anteriormente, pues no admiten los análisis que se han realizado debido a que las medidas craneométricas no son específicas de regiones anatómicas definidas, estando en desacuerdo con el diseño funcional de la investigación llevado a cabo por algunos de los autores precedentes. Para corregir los problemas del muestreo que presentaban estudios precedentes procedieron a configurar una muestra adecuada. Los cráneos empleados en el presente estudio son los cráneos provenientes de las excavaciones llevadas a cabo por George Dorsey (1895) en la zona de Ancón de la costa de Perú, estos cráneos hoy en día están en Estados Unidos en el Chicago Field Museum. El número de cráneos peruanos con deformación antero-posterior (fronto-occipital erecta de Imbelloni) es de un total de 64 de los cuales aproximadamente la mitad están solo parcialmente modificados. El grupo control proviene de la misma expedición y está integrado por 47 individuos sin deformación aparente. Los autores no han hallado dimorfismo sexual apreciable en los cráneos deformados analizados, por tanto, procedieron a analizarlos a todos juntos sin tener en cuenta el sexo. En el estudio también emplearon un grupo poco numeroso de cráneos de indios Songish (6 deformados y 4 no deformados), provenientes de la expedición de Franz Boas (1891) a la British Columbia. Estos cráneos además de ser un grupo escasamente representativo y heterogéneo, al tener un tipo de deformación por cuna totalmente distinto al de los antiguos peruanos, son menos relevantes para nuestro estudio. Se realizó un análisis tridimensional con elementos finitos que les ha permitido comprobar que en los cráneos Ancón la deformación craneal desencadena una cascada en el desarrollo craneo-facial provocando una base craneal más ancha, y una cara más chata pero más ancha. Se produce también, según los autores, un incremento de la distancia intercondílea y una disminución de la profundidad mandibular (Cheverud y Midkiff, 1992). La alteración de la fosa craneal anterior se traduce en una alteración del complejo naso-maxilar con una disminución antero-posterior de la bóveda palatina. Los autores se muestran críticos con el sistema de medición tradicional y abogan por los elementos finitos que permitirían, a su parecer,

delimitar deformidades en zonas ocultas para otro tipo de medida más tradicional. El artículo es crítico con las teorías funcionales epigenetistas, los autores sostienen que la teoría de la matriz funcional de Moss, mantiene que el desarrollo de las diferentes estructuras craneofaciales se hace de un modo totalmente independiente las unas de las otras, lo que quedaría en entredicho tras los resultados del estudio (Cheverud *et al.*,1992). También Cheverud (1982), sostiene que hay correlaciones genéticas entre la morfología de la bóveda craneal y que hay una serie de caracteres faciales que están por encima de cualquier mecanismo epigenético externo, y que los genes que deciden la forma del neurocráneo definen también la forma del viscerocráneo. La serie de artículos es indudablemente muy significativa, la muestra está bien determinada, pero hay pequeños detalles que no han sido tenidos en cuenta: los autores sostienen que los cráneos de la excavación de Ancón pertenecen todos ellos a la etnia Huari y que se ha empleado un aparato deformador que, vista la imagen y siguiendo la opinión de Weiss difícilmente puede provocar una deformación antero-posterior como la que tienen los cráneos. La clasificación que realizan de la posición dentaria de los cráneos es confusa pues habla de “Clase III de Angle como disto-oclusión, y de Clase II de Angle como mesiooclusión [sic]”. Mantiene que la hipótesis de la matriz funcional de Moss sostiene la total independencia de las matrices encargadas del desarrollo del viscerocráneo y del neurocráneo además de las cápsulas independientes, cuestión que no es sostenida en los últimos artículos de Moss⁸. Tampoco está tan clara la interpretación de que Bjork y Björk (1964) encontraron mandíbulas más cortas en el lado que la deformación era mayor en cráneos asimétricos. En realidad Björk y Björk (1964), lo que sostienen es que hay una compensación funcional en el cráneo con deformación asimétrica y que la plagiocefalia que se produce y que es responsable de una asimetría en la posición de la fosa glenoidea no se transmite totalmente a la mandíbula, pues esta mantiene la posición de la línea media, la simetría funcional masticatoria a expensas de un desarrollo asimétrico de la rama y del cuerpo en el lado comprimido, como es lógico pensar ésta opinión de Björk y Björk (1964), está más próxima a lo sostenido por Moss (1997, a,b,c,d). Los artículos de Cheverud *et al.*, son relevantes en cuanto a las implicaciones mandibulares y maxilares en las deformaciones craneales, aspecto este no suficientemente analizado por los anteriores artículos, pero también es verdad que a pesar de su extrema laboriosidad el análisis de elementos finitos, a pesar de individualizar el estudio de estructuras anatómicas, muestra como el cráneo funciona como una unidad de crecimiento y función.

Dentro del mismo grupo de trabajo otras publicaciones relevantes son de Kohn *et al.*,(1993, 1995). Son dos trabajos de calidad, en el primero, los autores (Kohn *et al.*,1993) llegan a la conclusión de que la gran alteración de la forma de la bóveda craneal que supone la deformación circunferencial (anular para los autores) provoca una alteración dimensional de la base craneal.

8 Cf. Moss M.L, 1997 (a-d).

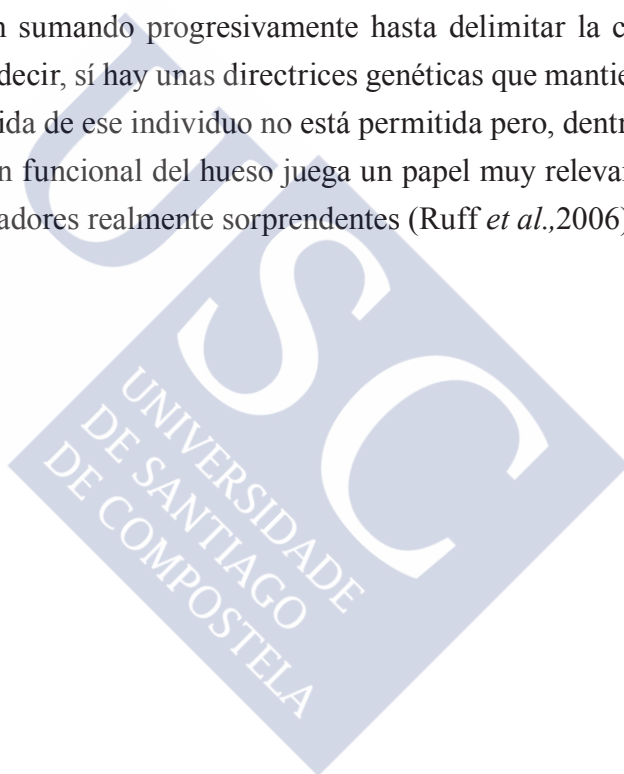


Como la base es el asentamiento posterior sobre el que se desarrolla la cara, la deformación es a la cara de modo que los sujetos sometidos a la deformación circunferencial presentan facies con menor anchura y medidas antero-posteriores mayores. Los autores enlazan sus resultados en este tipo de deformación con los encontrados en el estudio previo con deformación antero-posterior (Cheverud y Midkiff 1992; Cheverud *et al* 1992), sosteniendo que la base craneal funciona como un elemento “neutralizador” o “transmisor” de la deformación craneal hacia estructuras adyacentes que se hayan estrechamente integradas y que, por tanto, se ven muy afectadas en su desarrollo por los cambios dimensionales que se producen en la base craneal. En un estudio realizado algunos años más tarde (Kohn *et al.*,1995) sobre cráneos Hopi, con una leve deformación craneal, los autores, en cambio, no encuentran alteración de las estructuras del viscerocráneo ni en la base. Es decir que es preciso sobrepasar un cierto umbral en el grado de la deformación para que la alteración se transmita a la base y al viscerocráneo.

Sobre la interrelación (integración) entre diferentes estructuras craneales (módulos), Martínez-Abadías *et al.*,(2009; b), llevaron a cabo un estudio sobre una muestra que incluía cráneos con deformación intencionada. El objetivo del trabajo era saber si las distintas estructuras que constituyen el cráneo ven variada su integración, es decir su covariación, cuando son sometidas a un proceso de remodelación tan extremo como la deformación de la bóveda, o si en realidad, la integración entre diferentes estructuras craneales es algo tan estrechamente preestablecido, en el patrón de desarrollo que la deformación es incapaz de alterarla. El resultado que obtuvieron fue que la integración entre bóveda, base y cara parece estar regida fundamentalmente por el desarrollo del sistema nervioso central siendo un requerimiento de orden superior a la deformación craneal, es decir, se mantienen, en líneas generales, los patrones de covariación entre las diferentes estructuras craneales, esta integración es mayor cuanto menor es la acción deformadora, es decir en cráneos con modificación puntual de la forma de la bóveda los patrones de integración no se ven afectados. En cráneos con gran deformación (circunferenciales) los patrones de integración se ven afectados produciéndose la aparición de modularidad entre diferentes estructuras craneales. Así, es precisa una acción severa sobre la zona frontal y la zona occipital para que los patrones de integración pre-establecidos se vean muy dañados.

Jimenez *et al.*,(2012), en un estudio comparativo entre cráneos con deformación antero-posterior y cráneos aparentemente no deformados de Makatampu, encontraron ciertas variaciones en las medidas del complejo nasomaxilar respecto a los encontrados por Cheverud *et al.*,(1992), tampoco hallaron la contracción antero-posterior de la mandíbula que habían presentado Cheverud y Midkiff (1992). Jimenez *et al.*,(2012) defienden que a pesar de que la integración entre diferentes unidades del cráneo es un hecho, y que esta integración entre bóveda, base y maxilares queda demostrada por que la alteración de la base repercute en las dimensiones es-

pecialmente transversales en la zona zigomática. Pero paralelamente, existe un componente funcional que hace que algunas de las unidades sean capaces de poder adaptarse y desarrollar un crecimiento y un equilibrio propio, neutralizando el esquema de las estructuras deformadas con las que a pesar de todo, están estrechamente relacionadas. La deformación de la bóveda craneal para estos autores si afecta métricamente a los maxilares pero no parece afectar la estructura dento-alveolar y la relación interarcadas. El modelo del “*palimpsesto*” propuesto por Hallgrímsson *et al.*, (2007) en el que el resultado final del sistema de covariaciones que se establecen entre las diferentes unidades funcionales en una estructura tan compleja como el cráneo, es el resultado de un continuo proceso de suma de hechos, de cambios, de influencias externas, que se van superponiendo. Existen una serie de factores constrictivos que limitan la plasticidad de las diferentes estructuras pero paralelamente hay una serie de factores propios del desarrollo y epigenéticos que se van sumando progresivamente hasta delimitar la covarianza entre las diferentes estructuras. Es decir, sí hay unas directrices genéticas que mantienen unos márgenes más allá de los cuales la vida de ese individuo no está permitida pero, dentro de esos márgenes la capacidad de adaptación funcional del hueso juega un papel muy relevante y puede llevar a cabo desarrollos compensadores realmente sorprendentes (Ruff *et al.*,2006).









8. OBJETIVO E HIPÓTESIS





El objetivo del presente trabajo fue el estudio de la influencia de la deformación de la base craneal en la posición de la mandíbula y en la del complejo nasomaxilar en cráneos con deformación artificial antero-posterior y circunferencial.

Para ello se formularon las siguientes hipótesis:

8.1 MANDÍBULA

Se definieron como partida tres hipótesis nulas.

La hipótesis nula 1 (Hmb01) es que la posición sagital de la mandíbula y su forma no se ve alterada por la deformación de la base craneal.

La hipótesis nula 2 (Hmb02) es que no han existido diferencias en las características morfológicas de la base craneal o de la mandíbula entre cráneos con deformaciones antero-posteriores y circunferencial y el grupo no deformado (control).

La hipótesis nula 3 (Hmb03) es que los patrones de integración entre los maxilares y la base craneal no cambian con las deformaciones antero-posterior y circunferenciales.

8.2 MAXILAR

Se definieron como partida dos hipótesis nulas.

La hipótesis nula 1 (Hmx01) es que la forma y posición sagital de las unidades que integran el complejo nasomaxilar no se ve alterada por la deformación de la base craneana.

La hipótesis nula 2 (Hmx02) es que los dos tipos de deformación no difieren en las alteraciones morfológicas de la base craneal o del complejo nasomaxilar.

Las hipótesis anteriores, además de ser testadas por medio de análisis de Morfometría Geométrica, se estudiaron por medio de Morfometría multivariable a partir de Cefalometría clásica. Se procedió a comparar la calidad y la cualidad de los resultados obtenidos por ambos métodos. Partiendo de una hipótesis de no diferencias entre ambos métodos.







9. MATERIAL Y MÉTODOS





El estudio se ha llevado a cabo sobre cráneos amerindios prehispánicos que pertenecen a la colección del Departamento de Antropología Física del Museo Nacional de Arqueología, Antropología e Historia del Perú (MNAAH), en la ciudad de Lima.

Se han utilizado en total 88 cráneos de sujetos adultos del sexo masculino que presentaban integridad de las estructuras craneales, prestando especial atención a la preservación de la maxila y mandíbula. De este conjunto se han hecho tres grupos. Uno de cráneos no deformados que servirá como grupo control (U) que estaba integrado por 39 cráneos sin deformación apa-



Fig.9.1 Cráneos deformados utilizados en el presente estudio. Izquierda, deformación circunferencial (C). Derecha, deformación antero-posterior (AP).

rente. Otro de 17 cráneos de individuos con deformación circunferencial (C) y un tercer grupo de 32 cráneos que presentaban deformación antero-posterior (AP) (Fig. 9.1).

Todos los cráneos provienen de sujetos que vivieron en la zona descrita como Central Andina, en concreto, de la franja de zona costera próxima a la actual Lima, en un intervalo cronológico aproximado entre el 100 a.C.- 1000 d.C. (esta datación proviene de las fichas y los informes del Departamento de Antropología Física del MNAAH de Lima). Se ha procurado emplear una franja temporal lo más estrecha posible, intentado atenuar los procesos microevolutivos que pudieran provocar un cambio en la estructura biológica a consecuencia de factores genéticos o ambientales. Como se ha expuesto anteriormente, en los capítulos de la introducción, los individuos que habitaron Ancón y Makat-Tampú presentan una gran proximidad fenotípica y genotípica, estando agrupados en el mismo cluster dentro del dendograma (Fig. 3.6) de antiguos pobladores peruanos (Dittmar, 1996). Autores como Shimada *et al.*, (2004), Shinoda *et al.*, (2006) y Fehren-Schmithz, (2010) han hallado gran afinidad entre el mtDNA de los distintos grupos de antiguos pobladores de la franja costera y una diferencia muy significativa con los pobladores del altiplano, lo que nos lleva a considerar estas poblaciones de la Franja Costera Central Andi-

na como muy similares fenotípicamente y, en concreto, en lo que a estructura craneal se refiere.

Los cráneos pertenecientes al grupo de deformación circunferencial o anular (C) provienen de la cultura Paracas, ya descrita en la introducción. En concreto de los enterramientos de Cavernas, Cerro Colorado y las Necrópolis de Wari Kayan y Arena Blanca. Pertenecen a un conjunto homogéneo de una etapa cultural de los primitivos pobladores de la península de Paracas (Tello y Xesspe, 1979).

Los cráneos con deformación antero-posterior (AP) provienen de las necrópolis de Ancon y se sitúan en una etapa cronológica de las fases tardías del Horizonte Medio (de acuerdo con su clasificación en el MNAAH).

A fin de obtener una muestra que no tuviera los problemas ya referidos en anteriores estudios se emplearon una serie de criterios de inclusión/exclusión:

La totalidad de los cráneos de los tres grupos tenían la mandíbula bien preservada.

Se excluyeron aquellos cráneos que presentaban asimetría llamativa de la bóveda craneal (ex visu).

En los cráneos con deformación antero-posterior se procedió a seleccionar aquellos que presentaran deformación tipo fronto-occipital costeña simétrica u occipital costeña (Weiss, 1962).

Se seleccionaron aquellos cráneos en los que la deformación frontal (provocada por los elementos estabilizadores del aparato deformador) fuera similar en todos ellos (Fig. 9.2). Se excluyeron todos aquellos cráneos que presentaban un intenso aplanamiento frontal.

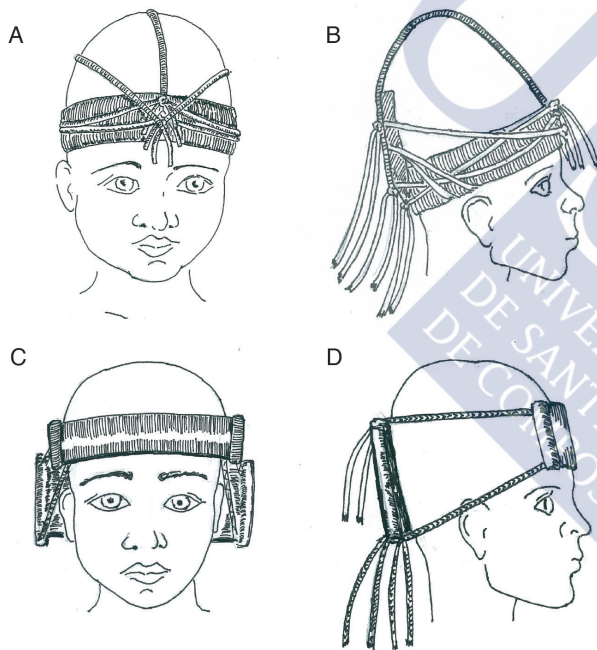


Fig. 9.2 Representación de los aparatos utilizados en la deformación craneal estudiados en este trabajo. Circunferencial: con vendaje perimetral (A, C). Antero-posterior con tablas rígidas en frontal y occipital y tensores entre ellas (B, D). (Realizado a partir de la información de Weiss, 1961 y Cabieses, 1974).

Se procedió a excluir todos aquellos en los que fuera evidente algún tipo de escotadura (suprainiana o supramastoidea) que hiciera sospechar el empleo de otro elemento deformador diferente del descrito para estas tipologías (véase introducción sobre deformación craneal).

Se seleccionaron cráneos con integridad de las estructuras anatómicas, prestando especial

atención a la preservación de aparato estomatognático.

Se han seleccionado cráneos con morfología masculina procurando evitar el posible sesgo de dimorfismo sexual en los valores craneométricos e intentando obtener una muestra lo más homogénea posible.

Para la determinación del sexo se utilizaron criterios morfológicos como el desarrollo de la glabella, de la arcada zigomática y de las apófisis mastoideas (Buikstra y Ubelaker, 1994; Manríquez *et al.*, 2006). Es éste un aspecto polémico, pues algunos autores opinan que dentro de estos cráneos deformados, no hay dimorfismo sexual propiamente dicho pues la deformación altera muchos de estos caracteres; además el empleo de cráneos adultos hace que la androgenización del cráneo femenino haga menos aparente estas diferencias.

La edad fue estimada en base a la erupción del tercer molar, su grado de atrición (cuando estaba presente) y en base a la fusión de la sincondrosis esfeno-occipital (Brothwell, 1981) y se tomaron solo cráneos adultos.

9.1 MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA

Se realizaron telerradiografías laterales fijando los cráneos en un cefalostato, de un aparato de rayos Planmeca PM CC 2002 Proline, Finland. Los cráneos se colocaron de forma paralela a la horizontal de Frankfurt y la maxila y mandíbula fueron articuladas en posición de máxima

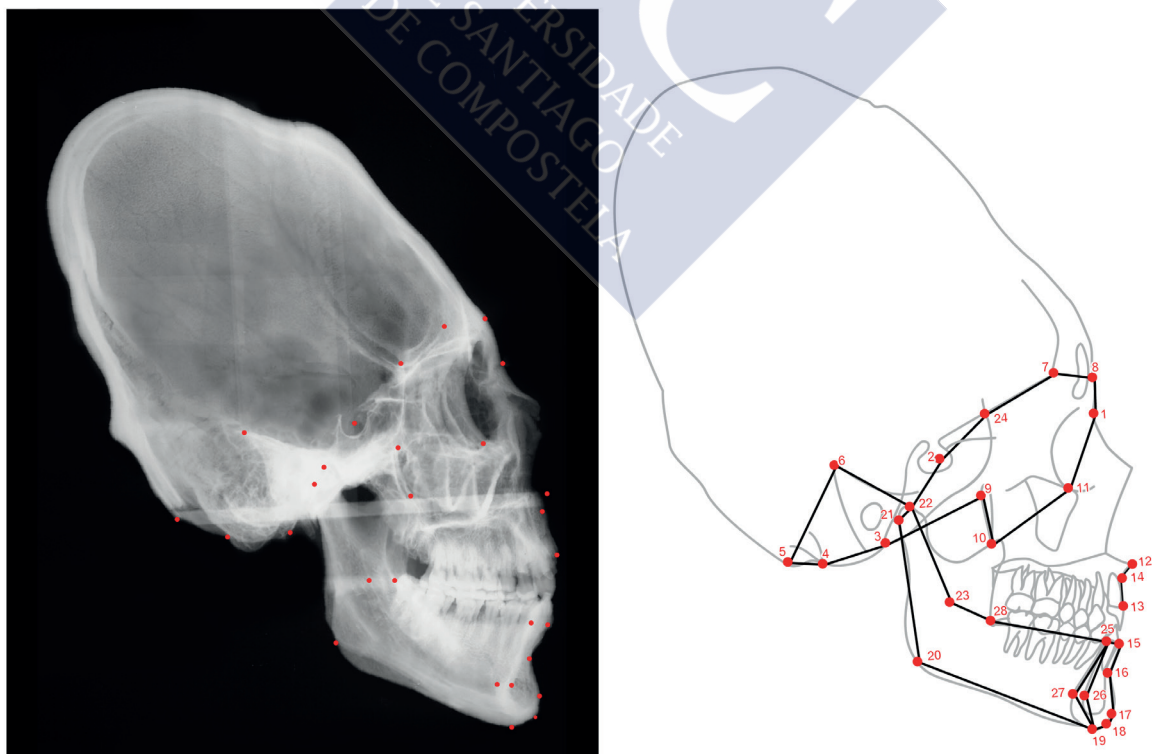


Fig. 9.3 Izquierda. Deformación circunferencial con los *landmarks* utilizadas en el análisis. Derecha. *Wireframe* utilizado en el estudio. Ver Tabla 9.1 para una explicación de la posición de los *landmarks*.

Numero	Landmarks craneales	Definición landmarks craneales
Base craneal		
Landmark 1	Nasion	Punto más anterior de la sutura fronto-nasal. Línea media.
Landmark 2	Sella	El centro de la silla turcica (fosa pituitaria). Línea media.
Landmark 3	Basion	Punto más inferior y ventral en la margen anterior del foramen magnum. Línea media.
Landmark 4	Punto de Bolton	Punto más alto de la curvatura entre el condylus occipitalis y el borde inferior del hueso occipital. Línea media.
Landmark 5	Squama Occipitalis	Punto de máxima convexidad del contorno externo de la escama occipital. Línea media.
Landmark 6	Crista Temporalis	Punto más posterior de la fosa craneal media, en la sutura temporo-parietal. Lateral.
Landmark 7	Foramen Coecum	Punto más anterior de la lamina cribrosa en la unión con la tabula interna del frontal. Línea media.
Landmark 8	Glabela	Punto más prominente de la cresta supraorbitaria. Línea media.
Landmark 9	Fosa Pterygopalatina	Punto más postero-superior de la fosa pterygopalatina. Lateral.
Landmark 10	Fisura Pterygomaxilar	Punto más inferior de la fisura pterygomaxilar. Lateral.
Landmark 11	Orbital	Punto más bajo del borde inferior de la órbita. Lateral.
Landmark 24	Wing	Unión entre el yugum sphenoidal y el ala mayor. Lateral.
Mandíbula		
Landmark 15	Infradental	Punto más alto y más anterior del proceso alveolar externo. Línea media.
Landmark 16	Punto B Supramental	Punto más posterior del contorno externo de la sínfisis. Línea media.
Landmark 17	Pogonion	Punto más anterior en la sínfisis. Línea media.
Landmark 18	Gnathion	Punto más anteroinferior de la sínfisis mandibular. Línea media.
Landmark 19	Menton	Punto más caudal en el contorno de la sínfisis. Línea media.
Landmark 20	Gonion	Punto de máxima convexidad del borde externo del ángulo de la mandíbula. Lateral.
Landmark 21	Condilare Posterior	Punto más posterior en el contorno dorsal del cóndilo. Lateral.
Landmark 22	Condylion	Punto más superior en la cabeza del cóndilo. Lateral.
Landmark 23	Punto Xi	Punto construido en el centro de la rama. Lateral.
Landmark 25	Infradental Lingual	Punto más alto y más posterior en el proceso alveolar lingual. Línea media.
Landmark 26	Apófisis Geni	Punto más convexo en la superficie posterior de la sínfisis. Línea media.
Landmark 27	Tabula Interna	Punto más convexo en la tabula interna. Línea media.
Landmark 28	Fosa Retromolar	Punto más bajo en el borde anterior de la rama. Lateral.
Maxilar		
Landmark 12	Espina Nasal Anterior (ENA)	Proyección de hueso más anterior en el suelo de la cavidad nasal. Línea media.
Landmark 14	Subespinal (A)	Punto más profundo en la concavidad entre la ENA y el Prosthion. Línea media.
Landmark 13	Prosthion	Punto más oclusal de la cresta alveolar bucal. Línea media.

Tabla 9.1. Definición Landmarks. Mandíbula.

intercuspidación y mantenidas en oclusión con bandas elásticas.

Las radiografías fueron digitalizadas utilizando una cámara Nikon D70 con una lente Nikkor 18-70 AF-S ED colocada en un trípode (Kaiser RS2, Germany). Se emplearon en la determinación de coordenadas de los *landmarks* los programas tpsUtil Versión 1.52. y el tpsDig 2

2.16 (Rohlf 1997-tpsSeries (J.F. Rohlf, Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook; <http://life.bio.sunysb.edu/morph/>). En la definición, tanto de la base como de mandíbula y maxila, se emplearon *landmarks* de Tipo 1, Tipo 2 y algunos tipo 3 (Bookstein 1991) (Tabla 9.1 y 9.2). Los *landmarks* fueron fijados por un investigador y revisados por otro senior. El error de fijación de los *landmarks* fue determinado realizando el marcado de 10 de ellos 2 veces distintas con 2 semanas de diferencia.

Se realizó un estudio ANOVA (Bailey y Byrnes, 1990) y no se halló diferencia significativa entre los muestreos repetidos (*repeated samples*); indicando que el error de medida era inferior a la variación entre sujetos.

El análisis de geometría morfométrica (GMA) fue llevado a cabo con el software MorphoJ versión 1.06b * (Klingenberg, 2011). Los datos de los *landmarks* fueron analizados por procedimientos estándar morfométricos (Superposición Procrustes y TPS) (Fig. 9.3 y 9.4).

Se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para la totalidad de la muestra y se procedió a estudiar los primeros PCs (deformaciones singulares) a fin de determinar aquellos cambios morfológicos que encierran la mayor variabilidad de la muestra en el espacio forma.

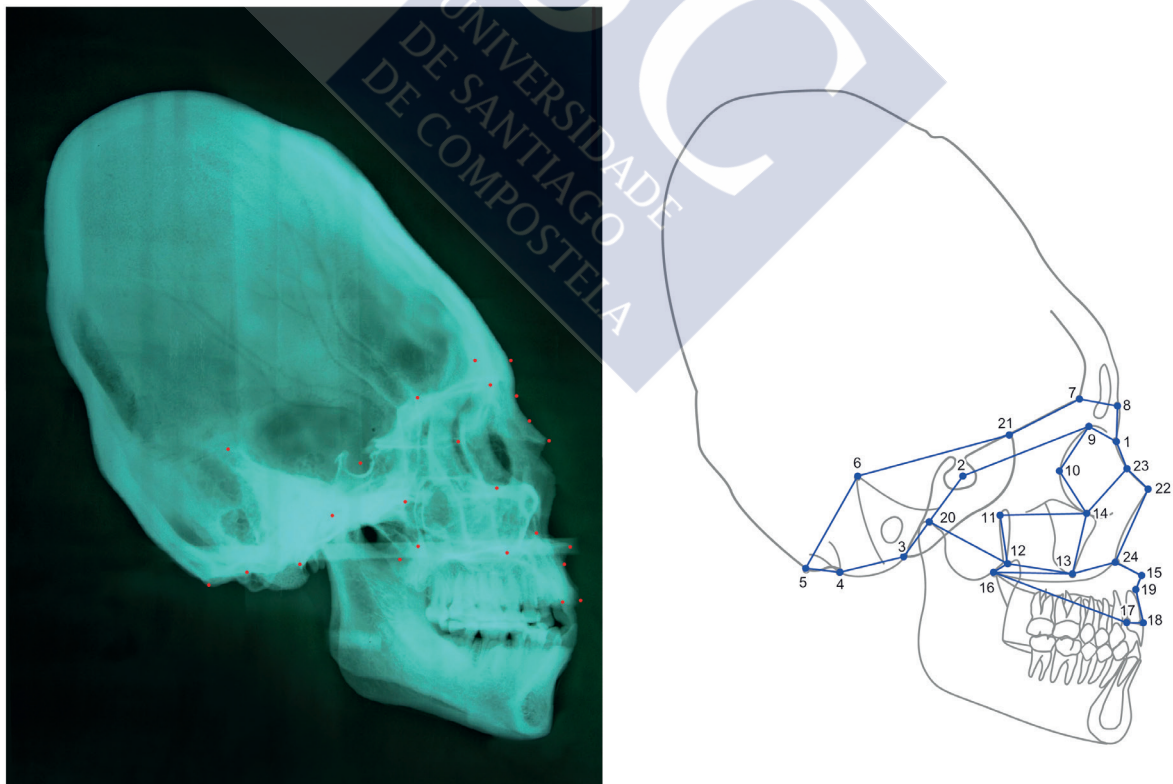


Fig. 9.4 Izquierda, rx de un cráneo con deformación circunferencial. Derecha, *wireframe* y *landmarks* utilizados en el análisis. Ver la tabla 9.2 para una explicación de la posición de los *landmarks*.

Numero	Landmarks craneales	Definición landmarks craneales
Landmark 1	Nasion	Punto más anterior de la sutura fronto-nasal. Línea media.
Landmark 2	Sella	El centro de la sella turcica (fosa pituitaria). Línea media.
Landmark 3	Basion	El punto más inferior y ventral en la margen anterior del foramen magnum. Línea media.
Landmark 4	Punto de Bolton	Punto más alto de la curvatura entre el condylus occipitalis y el borde inferior del hueso occipital. Línea media.
Landmark 5	Squama Occipitalis	Punto de máxima convexidad del contorno externo de la escama occipital. Línea media.
Landmark 6	Crista Temporalis	Punto más posterior de la fosa craneal media, en la sutura temporo-parietal. Lateral.
Landmark 7	Foramen Coecum	Punto más anterior de la lamina cribrosa en la unión con la tabula interna del frontal. Línea media.
Landmark 8	Glabela	Punto más prominente de la cresta supraorbitaria. Línea media.
Landmark 9	Orbitale Superior	Punto más superior del reborde superior de la órbita. Lateral.
Landmark 10	Orbitale Posterior	Punto más posterior del reborde lateral de la órbita. Lateral.
Landmark 11	Fosa Pterygopalatina	Punto más postero-superior de la fosa pterygopalatina. Lateral.
Landmark 12	Fisura Pterygomaxilar	Punto más inferior de la fisura pterygomaxilar. Lateral.
Landmark 13	Zygoma	Punto más inferior en el contorno exterior del proceso zigomático. Lateral.
Landmark 14	Infraorbital	Punto más bajo del borde inferior de la órbita. Lateral.
Landmark 15	Espina Nasal Anterior (ENA)	Proyección de hueso más anterior en el suelo de la cavidad nasal. Línea media.
Landmark 16	Espina Nasal Posterior (ENP)	Punto más posterior del paladar duro. Línea media.
Landmark 17	Incisal	Punto más oclusal de la cresta alveolar palatina. Línea media.
Landmark 18	Prostion	Punto más oclusal de la cresta alveolar bucal. Línea media.
Landmark 19	Subspinale (A)	Punto más profundo de la concavidad entre ENA y Prostion. Línea media.
Landmark 20	Glenoid	Punto más bajo en el contorno de la fosa glenoidea. Lateral.
Landmark 21	Wing	Unión entre el yugum esfenoidal y el ala mayor. Lateral.
Landmark 22	Nasal Inferior	Punto más anterior e inferior de los huesos nasales. Línea media.
Landmark 23	Nasal Medium	Punto medio entre el Nasion y el Nasal Inferior. Línea media.
Landmark 24	Pyriformis	Punto más posterior del reborde pyriformis en el maxilar. Lateral.

Tabla 9.2. Definición Landmarks. Maxilar Superior.

Los estudios se centraron en aquellos PCs que representan 5% o más de la varianza total.

Se llevó a cabo el estudio de las deformaciones recurriendo a TPS y *wireframes* correspondientes a los valores extremos (positivos y negativos) de los componentes principales, con la intención de detectar la magnitud, la dirección en la que se produce el cambio de forma y, especialmente, determinar cuáles son las zonas en las que el cambio es más pronunciado (Paschetta *et al.*, 2010).

Un CVA fue empleado para estimar la significación de las diferencias entre las medias anatómicas de los tres grupos. Como ya se ha comentado el CVA permite delimitar mejor la posible diferencia entre las variaciones morfológicas de los grupos.

Se empleó el análisis de función discriminante (DFA) para aquilatar las diferencias anatómicas y determinar las separaciones entre las medias de los diferentes grupos (Zelditch *et al.*, 2004). Para ello se ha utilizado el estudio de la deformación en TPS y *wireframes* que permiten visualizar los *scores* (valores) y determinar aquellas regiones del cráneo en las que se produce compresión y aquellas otras en las que el resultado es una expansión compensadora. También permitió identificar aquellas zonas de interfase más estables (Zelditch *et al.*, 2004; Klingenberg, 2011). El P alfa de significación se fijó en 0.05.

En el estudio de la mandíbula y referencia maxilar (solo se han utilizado 3 *landmarks*) (Fig. 9.3) para verificar el grado de integración entre maxilares y base craneal y conocer los posibles cambios en los patrones de integración que provoca la deformación, se procedió a realizar un análisis de menores cuadrados parciales (*Partial Least Squares-PLS*) en dos bloques. En este estudio, y dada la proximidad de las estructuras que además comparten áreas funcionales, se procedió a seleccionar el modo de análisis “dentro de una configuración”. En un bloque se tomaron los *landmarks* de la mandíbula y maxilar (bloque 2) y en el otro los correspondientes a la base craneal (bloque 1). Los PLS1 scores de la totalidad de la muestra fueron estudiados con un análisis ANOVA univariable, a fin de constatar la posible diferencia de covarianza entre los dos bloques en los tres grupos de cráneos. Se estudiaron también los patrones de integración en la

Landmarks craneales	Definición landmarks craneales
Nasion (N)	Punto más anterior de la sutura fronto-nasal. Línea media.
Sella (S)	El centro de la silla turcica (fosa pituitaria). Línea media.
Basion (Ba)	Punto más inferior y ventral en la margen anterior del foramen magnum. Línea media.
Punto de Bolton (Bo)	Punto más alto de la curvatura entre el condylus occipitalis y el borde inferior del hueso occipital. Línea media.
Fosa craneal anterior (Fca)	Línea que pasa por el foramen coecum y termina a nivel de la base de la apófisis clinoides anterior. Línea media.
Espina nasal anterior (ENA)	Proyección de hueso más anterior en el suelo de la cavidad nasal. Línea media
Subespinal (A)	Punto más profundo en la concavidad entre la ENA y el Prosthion. Línea media.
Punto B supramental (B)	Punto más posterior del contorno externo de la sínfisis. Línea media.
Protuberancia menti (Pm)	Punto ubicado en el contorno anterior del mentón, en donde la sínfisis de la mandíbula pasa de cóncava a convexa. Línea media.
Pogonion (Pog)	Punto más prominente en la parte anterior de la sínfisis mentoniana. Línea media.
Gonion (Go)	Punto de máxima convexidad del borde externo del ángulo de la mandíbula. Lateral.
Gnathion (Gn)	Punto más anteroinferior de la sínfisis mandibular. Línea media.
Punto Xi (Xi)	Punto construido en el centro de la rama. Lateral.
Articular (Ar)	Punto en la intersección del borde posterior de la rama con la apófisis basilar del occipital. Lateral.

Tabla 9.3. Definición Landmarks. Cefalometría clásica multivariable.

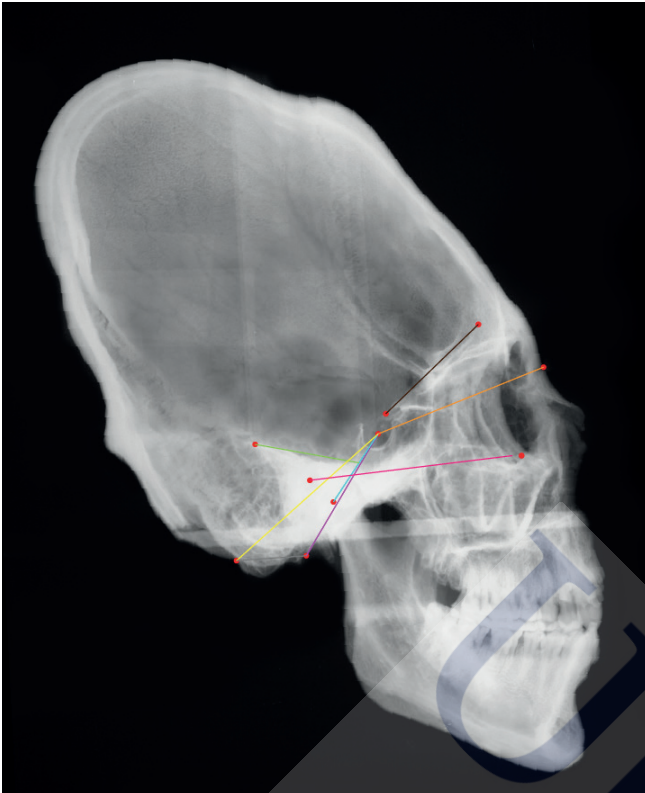


Fig.9.5 Estudio de la base craneal. Línea N-S (naranja). Línea S-Ba (púrpura). Línea S-Ar (azul). Línea Fca (marrón). Línea Ptem (verde). Línea S-Bo (amarillo). Línea Ba-Bo (gris). Línea PFc (fucsia).

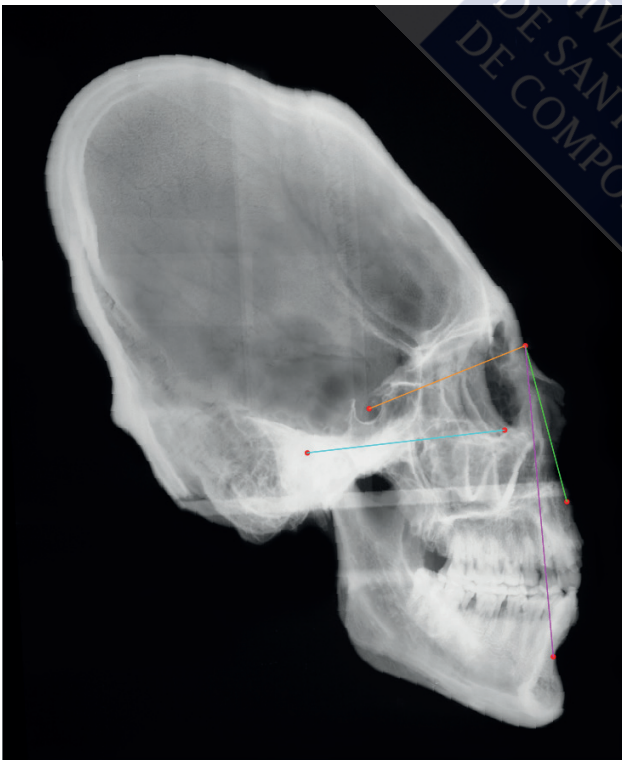


Fig.9.6 Estudio de la posición de maxilares. Línea N-S (naranja). Línea N-A (verde). Línea N-B (púrpura). Línea PFc (azul).

muestra total y en cada uno de los grupos.

9.2 CEFALOMETRÍA CLÁSICA MULTIVARIABLE (CCM)

La muestra empleada fue el grupo de cráneos deformados amerindios descrito en los anteriores estudios de morfometría geométrica con las imágenes de tele lateral de cráneo y cara. En esas imágenes se procedió a marcar los siguientes puntos cefalométricos representados en la tabla 9.3.

Estos puntos cefalométricos se emplearon para trazar líneas cefalométricas entre las cuales se procedió a estudiar diferentes ángulos de configuración craneal. Estas mediciones se hicieron manualmente y también utilizando el programa tpsDig 2 2.16 (Rohlf 1997-tpsSeries, J.F. Rohlf, Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook at: <http://life.bio.sunysb.edu/morph/>). Por ello, como se expondrá más adelante, se estudió la diferencia entre los dos métodos hallándose un coeficiente de correlación intraclase (ICC).

Se prefirieron los ángulos a las medidas lineales para evitar el problema inherente a la diferencia de tamaño entre los individuos que en el estudio de los ángulos queda más atenuado. Siguiendo los análisis de cefalometría clásica (Zamora y Duarte Inguanzo, 2003) y aquellos trazados empleados en estudios previos (Anton, 1989; McNeill y Newton, 1965; Moss, 1958) se procedió a

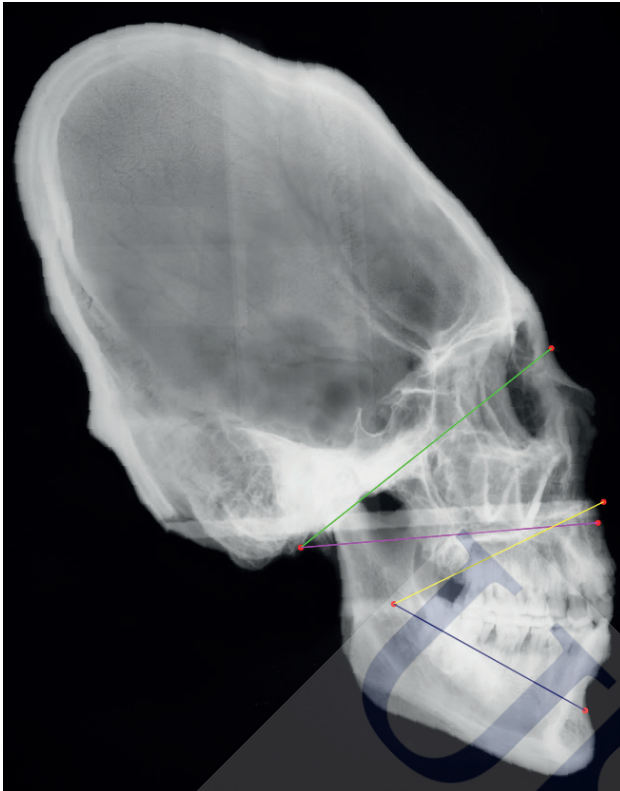


Fig.9.7 Cuantificación del desarrollo vertical facial.
Línea N-Ba (verde). Línea Ba-A (púrpura). Línea ENA-Xi (amarillo). Línea Xi-Pm (azul).

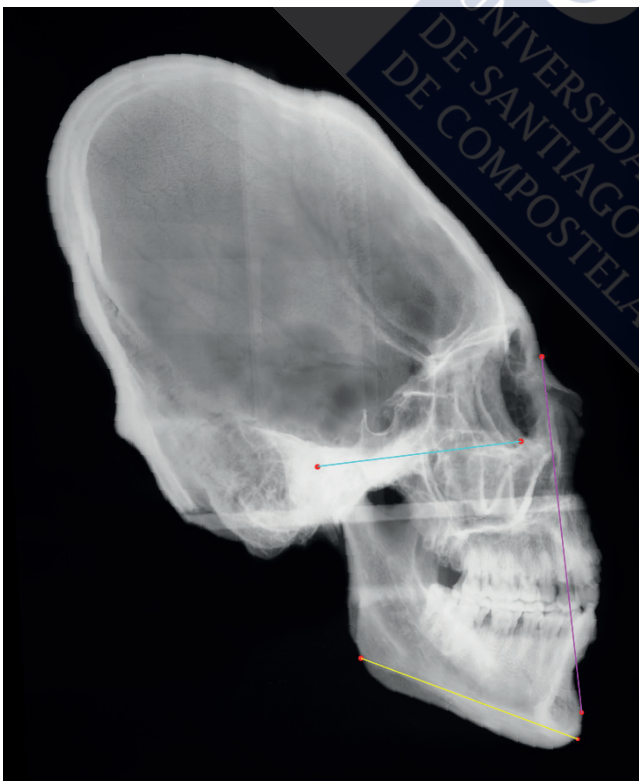


Fig.9.8 Disposición del plano mandibular.
Línea Gn-Go (amarillo). Línea PFc (azul).
Línea N-Pog (fucsia).

medir una serie de ángulos que configurarían las variables a estudiar en el presente capítulo.

Base Craneal (Fig. 9.5): para el estudio de la base craneal que presenta una gran relevancia, como ya se ha expuesto, en este tipo de cráneos, se seleccionaron las siguientes variables:

- N-S-Ba. Es uno de los trazados más clásicos en cefalometría, mide la angulación entre la fosa craneal anterior y la fosa craneal media, tiene relación directa con los procesos de crecimiento de la sincondrosis esfeno-occipital y la sincondrosis esfenoetmoidal.

- N-S-Ar Es un ángulo muy similar al anterior pero, en este caso la relación de la fosa craneal anterior se refiere a la posición antero-posterior de la cabeza del cóndilo que define el punto articular de Björk.

- Fca^S-Ba. Es también una variable que nos relaciona los planos de la fosa craneal anterior con la fosa craneal media, pero la fosa craneal anterior tiene el referente intracraneal.

- Ptem^{PFc}. Es una variable que mide la pendiente del peñasco del temporal en relación a la horizontal alemana. La línea sigue la proyección de la pared posterior de la fosa craneal media.

- N-S-Bo. Es una variable que relaciona la base craneal anterior con el movimiento

ascendente o descendente de la base craneal posterior.

- S-Ba[^]Ba-Bo. Mide el ángulo clivo-foraminal, relaciona la zona medial de la base craneal media con el plano del *foramen magnum*.

Posición de maxilares (Fig. 9.6): Se tomaron las dos variables clásicas de Steiner (SNA y SNB).

- S-N-A. Relaciona la posición antero-posterior del maxilar superior con la base craneal anterior.

- S-N-B. Relaciona la posición antero-posterior de la mandíbula con la base craneal anterior.

- PFc[^]N-A. Relaciona la posición antero-posterior del maxilar superior con el plano horizontal.

Para cuantificar el **desarrollo vertical facial** se tomaron dos variables (Fig. 9.7):

- N-Ba-A. Como variable que recoge la dimensión vertical del tercio medio facial.

- ENA-Xi-Pm. Como variable en relación con la dimensión vertical del tercio facial inferior.

Para la disposición del **plano mandibular** se tomaron dos variables (Fig. 9.8):

- Gn-Go[^]PFc. Que mide la angulación del plano del cuerpo mandibular.

- PFc[^]N-Pog. Que mide la posición antero-posterior de la mandíbula referente a la perpendicular al plano de Fráncfort.

9.3 MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Se realizó una prueba de error de medida de los ángulos. Para ello y para valorar el error de las mediciones manuales se procedió a la utilización del programa tpsDig 2 2.16. Se llevó a cabo un estudio de fiabilidad de la medida (ICC) en SPSS. Se hicieron mediciones de dos

Estadísticos de fiabilidad

Alfa de Cronbach	N de elementos
,987	2

Coefficiente de correlación intraclase

	Correlación intraclase ^b	Intervalo de confianza 95%		Prueba F con valor verdadero 0			
		Límite inferior	Límite superior	Valor	gl1	gl2	Sig.
Medidas individuales	,974 ^a	,961	,982	75,193	93	93	,000
Medidas promedio	,987 ^c	,980	,991	75,193	93	93	,000

Tabla 9.4. Medición de error. Estudio de fiabilidad en SPSS.

angulos el N-S-Ba y el N-S-ENP. Estos han sido realizados para hacer una comparación entre las mediciones manuales y las del programa y valorar el posible error (tabla 9.4).

En primer lugar se procedió a comprobar la normalidad de las variables con un test de K-S en cada una de ellas. Todas las variables presentaron una distribución normal.

Estas 13 variables se estudiaron en un ANOVA con factor de agrupación deformación (no deformados, circunferenciales y anteroposteriores)(tabla 15.1, Apéndice I). De este primer análisis prospectivo se tomaron las variables que mostraron diferencias significativas entre los tres grupos (tabla 9.6), con estas variables, dada su correlación se llevó a cabo un estudio de reducción de dimensiones, un análisis factorial de componentes principales. El análisis de componentes principales persigue también definir la estructura de la muestra. En la tabla 9.5 se puede ver la matriz de correlaciones de las variables introducidas en el estudio. La idoneidad muestral se comprobó con KMO y Bartlett (tabla 15.2, Apéndice I). Se definió la extracción de componentes principales (PC) con un autovalor por encima de la unidad. De este modo se tomaron los tres primeros PCs, que como se puede observar en la gráfica de saturación (véase fig. 10.17, en resultados) cumplen la regla del acantilado y en la tabla de autovalores (véase tabla 10.5, en resultados) contienen una explicación de la varianza total del 71.2%. Como se observa en la distribución de la matriz de componentes (véase tabla 10.6, en resultados) hay una serie de variables que cargan por encima de 0.32 en más de un componente, es decir, es preciso realizar una rotación de coordenadas para relacionar de una manera más nítida los factores obtenidos con las entidades teóricas de partida (Thurstone, 1947). Se realizó una rotación Oblimin con Kaiser y se obtuvo la matriz de estructura (véase tabla 10.7, en resultados) en la que aprecia la reducción de variables complejas y se tomarán en cuenta aquellas cargas por encima de 0.32 (Tabachnick y Fidell, 2007, pág. 646-647) para estudiar la estructura de la muestra. Como se puede comprobar en la matriz de correlaciones de los componentes (véase tabla 10.8, en resultados), no hay correlación entre los componentes obtenidos por tanto la rotación elegida es válida (Thurstone, 1947).

Tabla 9.5 - Matriz de correlaciones

Correlación	SBa<BaOp1	<N-S-Op1	<N-S-Ar	<N-S-Ba	<N-S-A	<S-N-B	Ptemporal <PFC	<Gn-Go/PFC	Fca<SBa	<Na-Ba-A	ENA-XI-Pm Ricketts
SBa<BaBo	1,000	,657	,167	,444	-,215	-,246	,031	,298	,411	,149	,139
<N-S-Bo	-,657	1,000	,354	,274	-,144	-,063	,343	-,177	,188	-,229	-,018
<N-S-Ar	,167	,354	1,000	,644	-,507	-,469	,385	,046	,720	-,048	,216
<N-S-Ba	,444	,274	,644	1,000	-,367	-,345	,417	,101	,829	-,297	,124
<S-N-A	-,215	-,144	-,507	-,367	1,000	,553	-,309	-,223	-,443	-,150	-,226
<S-N-B	-,246	-,063	-,469	-,345	,553	1,000	-,374	-,620	-,281	-,175	-,564
Ptem<PFC	,031	,343	,385	,417	-,374	-,374	1,000	,038	,340	-,130	,156
<Gn-Go/PFC	,298	-,177	,046	,101	-,223	-,620	,038	1,000	,077	,387	,696
Fca<S-Ba	,411	,188	,720	,829	-,443	-,281	,340	,077	1,000	-,133	,123
<Na-Ba-A	,149	-,229	-,048	-,297	-,150	-,175	-,130	,387	-,133	1,000	,287
ENA-XI-Pm Ricketts	,139	-,018	,216	,124	-,226	-,564	,156	,696	,123	,287	1,000



Tabla 9.6 - ANOVA de un factor

		Suma de cuadrados	gl	Sig.
SBa<BaBo	Inter-grupos	2755,675	2	,000
	Intra-grupos	9585,783	91	
	Total	12341,457	93	
<N-S-Bo	Inter-grupos	511,774	2	,000
	Intra-grupos	2124,141	91	
	Total	2635,915	93	
<N-S-Ar	Inter-grupos	625,207	2	,000
	Intra-grupos	3294,208	91	
	Total	3919,415	93	
<N-S-Ba	Inter-grupos	757,294	2	,000
	Intra-grupos	1980,919	91	
	Total	2738,213	93	
<S-N-A	Inter-grupos	177,308	2	,003
	Intra-grupos	1283,468	91	
	Total	1460,777	93	
<S-N-B	Inter-grupos	132,159	2	,023
	Intra-grupos	1531,543	91	
	Total	1663,702	93	
Ptem<PFc	Inter-grupos	2071,339	2	,000
	Intra-grupos	2259,097	91	
	Total	4330,436	93	
<Gn-Go /PFc	Inter-grupos	352,313	2	,007
	Intra-grupos	3035,102	91	
	Total	3387,415	93	
Fca<S-Ba	Inter-grupos	252,851	2	,030
	Intra-grupos	3148,862	91	
	Total	3401,713	93	
<Na-Ba-A	Inter-grupos	98,829	2	,001
	Intra-grupos	552,416	91	
	Total	651,245	93	
ENA-XI-Pm Ricketts	Inter-grupos	217,385	2	,004
	Intra-grupos	1045,303	58	
	Total	1262,689	60	
<PFc-NPog	Inter-grupos	69,918	2	,065
	Intra-grupos	1130,561	91	
	Total	1200,479	93	
<PFc-N-A	Inter-grupos	154,431	2	,111
	Intra-grupos	3113,484	91	
	Total	3267,915	93	







10. RESULTADOS





10.1 MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA

10.1.1 RESULTADOS MANDÍBULA

Los 5 primeros componentes principales (PC) acumulan el 62,9% de la varianza total (Fig. 10.1). El PC 5 es el último PC con más de 5% de la varian-

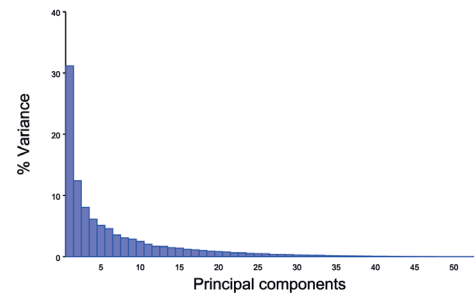


Fig. 10.1 Representación de los *eigenvalues* de los PCs. Distribución de la varianza.

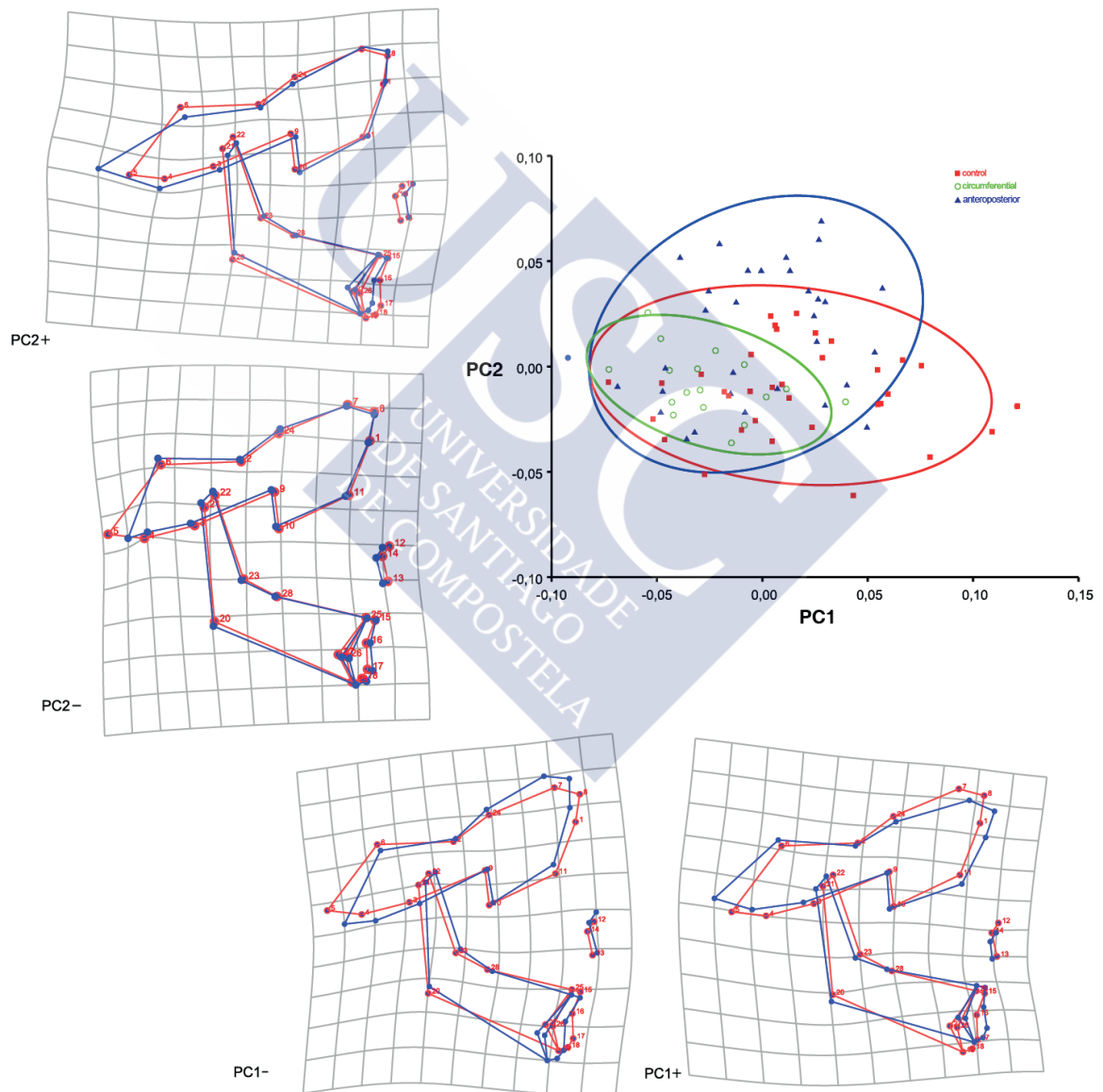


Fig. 10.2 Diagrama de dispersión (elipses con 90% de confianza) y representación *Thin-plate Spline* (TPS) de la transformación de los primero y segundo componentes principales (PC1 y PC2). Deformación Anteroposterior (AP): Triángulos azules; Deformación Circunferencial (C): círculos verdes; Control (U): cuadrados rojos.

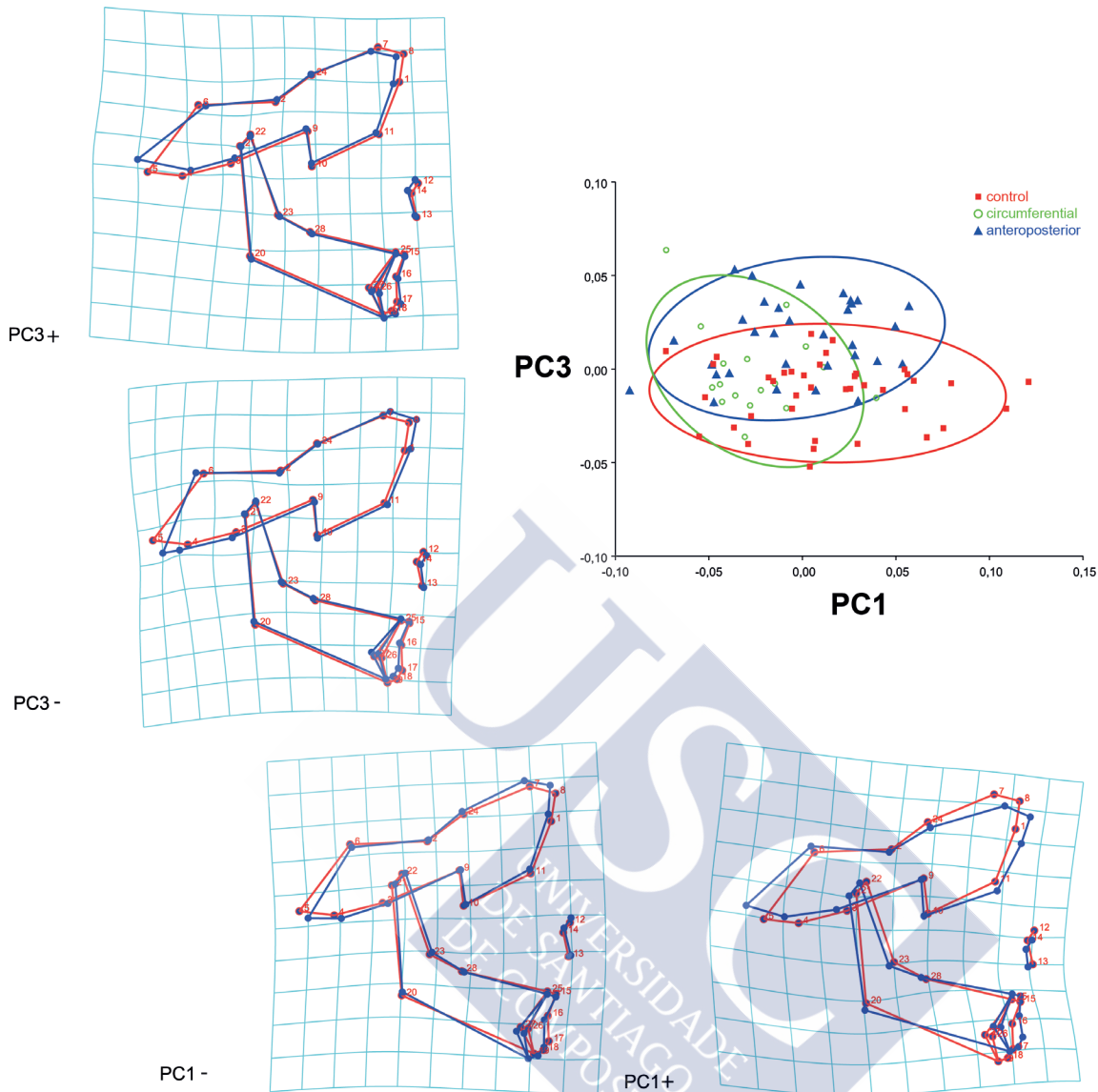


Fig. 10.3 Diagrama de dispersión (elipses con 90% de confianza) y representación *Thin-plate Spline* (TPS) de la transformación de los primero y tercero componentes principales (PC1 y PC3). Deformación Anteroposterior (AP): Triángulos azules; Deformación Circunferencial (C): círculos verdes; Control (U): cuadrados rojos.

za. Se van a describir fundamentalmente las deformaciones que se aprecian en los primeros tres PCs.

El PC1 es responsable del 32% de la varianza morfológica. Este PC indica una rotación global de la base craneal alrededor de la silla (Fig. 10.2). Los valores negativos están asociados con una rotación hacia atrás y arriba de la lamina cribrosa y un desplazamiento hacia atrás del nasion y de la glabella. El clivus y el suelo de la fosa craneal media han experimentado una rotación hacia delante y abajo. En el segmento posterior de la base craneal se observa una rotación hacia abajo del *foramen magnum* y un desplazamiento hacia delante de la escama del occipital. En la mandíbula, los valores negativos están asociados con una post-rotación global (a favor de la agujas del reloj) con un incremento en la dimensión vertical anterior. Este aumento en la

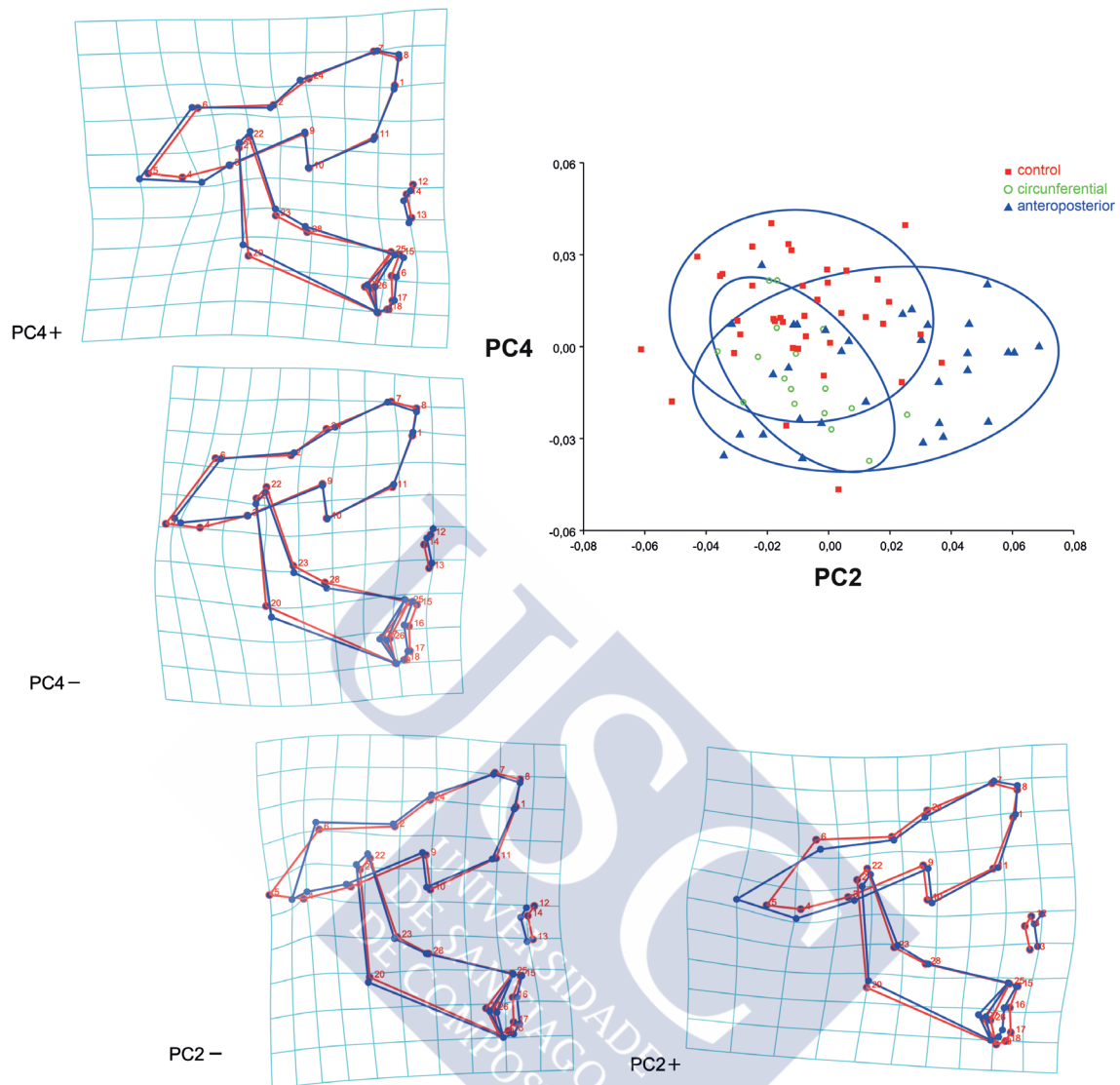


Fig. 10.4 Diagrama de dispersión (elipses con 90% de confianza) y representación *Thin-plate Spline* (TPS) de la transformación de los segundo y cuarto componentes principales (PC2 y PC4). Deformación Anteroposterior (AP): Triángulos azules; Deformación Circunferencial (C): círculos verdes; Control (U): cuadrados rojos.

dimensión vertical anterior favorece la aparición de un patrón dolicofacial con una posición más anterior del cóndilo, desplazamiento hacia atrás y abajo de la sínfisis, protrusión de la maxila y no protrusión de la mandíbula. La carga positiva en el PC1 muestra una rotación contraria de la base craneal y de la mandíbula, presentando un patrón braquicefálico que es fruto de una rotación antihoraria de la mandíbula y una rotación horaria de la base craneal, se acompaña de retrusión maxilar y de protrusión mandibular (Fig. 10.2). Es importante comentar que los cráneos con deformación circunferencial (C) son los que se encuentran, principalmente entre la carga negativa del PC1 (Fig. 10.2). El grupo control presenta una distribución más homogénea a lo largo de este componente.

La variación recogida por el PC2 (12% de la varianza) se caracteriza por el desplazamiento



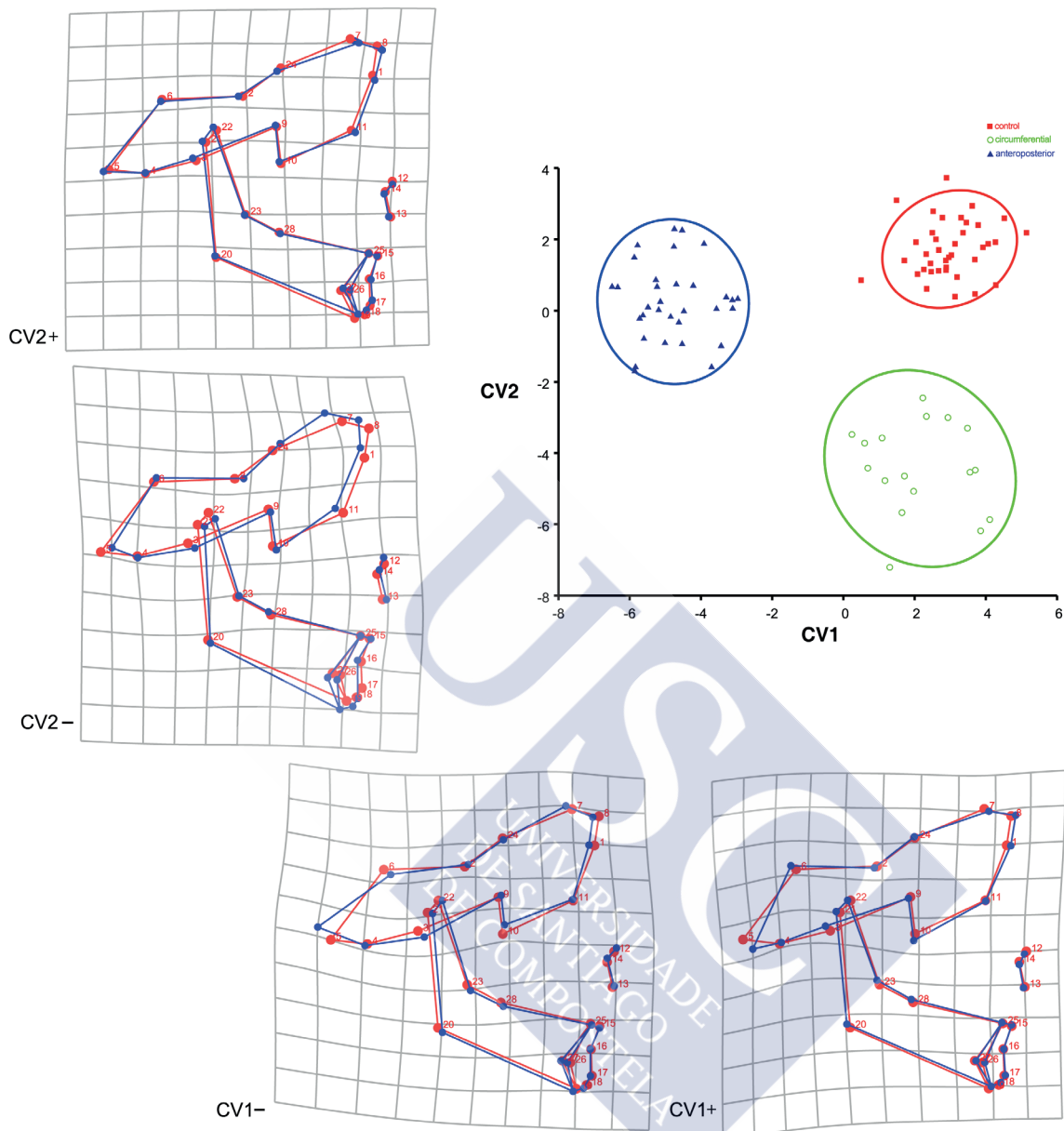


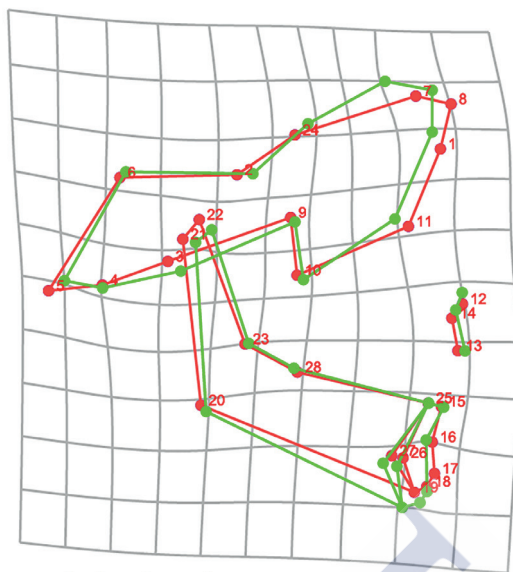
Fig. 10.5 Representación del diagrama de dispersión de las variantes canónicas (CV) para cada grupo de cráneos. Deformación Anteroposterior (AP): triángulos azules. Deformación Circunferencial (C): círculos verdes. Control: cuadrados rojos. Variación de forma a lo largo del eje correspondiente es mostrada por las rejillas de transformación *Thin-plate Spline* (TPS) (Valores máximos y mínimos con la media son representados).

Tabla 10.1. CVA y Distancias Procrustes. (CVA and Procrustes distances)

	<i>Eigenvalues</i>	%variance	cumulative %
CVA1	13.617	71.9	71.9
CVA2	5.3205	28.1	100.0

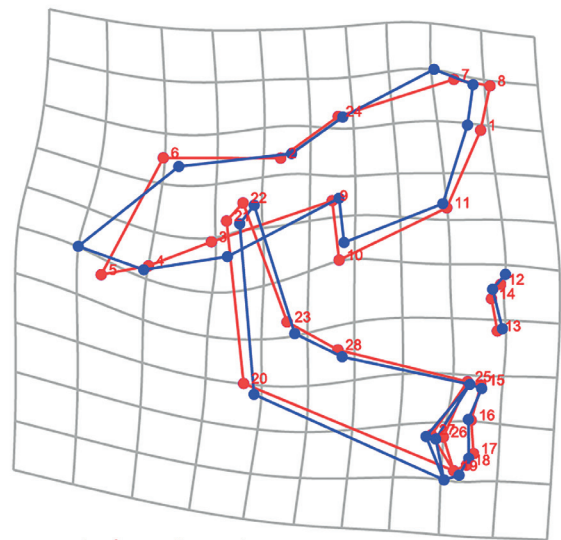
Distancias Procrustes and P-values del test de permutación.

	Distancias Procrustes	P-value
control : circumf	0.0556	<0.0001
control : AP	0.0539	<0.0001
circumf : AP	0.0491	0.0001



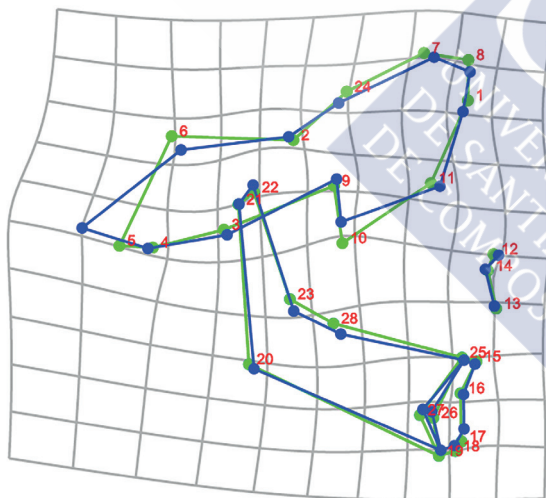
control - circunf

Fig.10.6 Diferencias morfológicas reveladas por el análisis de función discriminante (DFA); representación *wireframe* entre el grupo no deformado (U-rojo) y el grupo con deformación circunferencial (C-verde). Las diferencias fueron aumentadas 1.5 x.



control - ant-post

Fig.10.7 Diferencias morfológicas reveladas por el análisis de función discriminante (DFA); representación *wireframe* entre el grupo no deformado (U-rojo) y el grupo con deformación antero-posterior (AP-azul). Las diferencias fueron aumentadas 1.5 x.



circunf - ant-post

Fig.10.8 Diferencias morfológicas reveladas por el análisis de función discriminante (DFA); representación *wireframe* entre el grupo con deformación circunferencial (C-Verde) y el grupo con deformación antero-posterior (AP-azul). Las diferencias fueron aumentadas 1.5 x.

de la escama occipital y del *foramen magnum*, la protrusión (PC2+) y retrusión (PC2-) maxilar y por el tamaño del cuerpo y de la rama mandibular, con un componente protrusivo de la sínfisis en la carga negativa. Los valores del grupo AP son en su gran mayoría positivos en el PC2.

El PC3 con una carga de un 8.5% de la varianza, recoge la polaridad entre cambios de protrusión en maxilares y hueso frontal sin cambios en la rama y desplazamientos de la escama occipital (Fig. 10.3). La carga positiva con protrusión de sínfisis y retrusión del polo anterior de la base craneal y desplazamiento posterior de la escama del occipital recoge una morfología propia del grupo AP, mientras que PC3- recibe una carga mayoritaria de los

otros dos grupos.

El PC1 separa significativamente al grupo C del control (P=0.005). No separa la deformación AP de los otros dos. La combinación de PCs que segrega más efectivamente la muestra es el



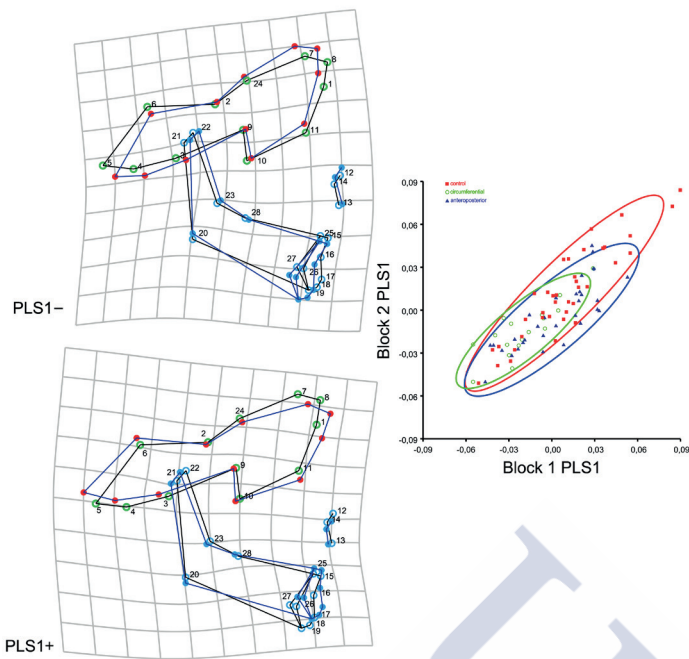


Fig.10.9 Diagrama de dispersión de los valores PLS1 bloque 1 - base craneal. PLS1 bloque 2 - mandíbula y maxila. PLS1 (muestra total) variación de la forma y patrones de integración. Wireframe y rejillas representan la amplitud de variación entre 0 y -1 (arriba) y 0 y +1 (abajo).

PC2 que separa los AP de los otros dos grupos (significación $P < 0.005$) con el PC4 que separa a los dos grupos deformados del grupo control (significación $P < 0.001$).

El PC2 hace referencia a una gran compresión antero-posterior de la base y el TPS del PC4 muestra los cambios morfológicos que se producen en la deformación (Fig. 10.4).

Las diferencias observadas entre las medias morfológicas de cada uno de los grupos fueron estudiadas con el análisis de variantes canónicas (CVA).

El CV1 (con el 72% de la varianza) muestra que el carácter que más discrimina es la deformación posterior de la fosa craneal media asociada a la rama y a la deformación del polo anterior de la base craneal (Fig. 10.5).

El CV1 establece una clara diferenciación entre el grupo con deformación AP y los otros dos grupos. La carga positiva es propia de la deformación C y del grupo control, y la carga negativa del grupo con deformación AP. El grupo con deformación AP muestra un desplazamiento posterior de la escama del occipital.

El CV2 (con el 28% de la varianza) separa al grupo con deformación C de los otros dos grupos.

El CV2 (con el 28% de la varianza) separa al grupo con deformación C de los otros dos grupos.

Tabla 10.2. Patrones de integración entre la base craneal y los maxilares.

P value testa la hipótesis nula de independencia entre los bloques.

	RV coeficient	P-value		Singular value	% total covar.	Correlation	P-value (perm pairwise)
total samp	0.5774	<0.001	PLS 1	0.00069	85.34	0.87463	<0.001
control	0.6886	<0.001	PLS1 control	0.00022	87.50	0.71740	0.004
circunf	0.6621	<0.001	PLS1 circunf	0.00054	62.0	0.91087	0.024
antero-post	0.5299	<0.001	PLS1 antero-post	0.00066	72.7	0.85624	<0.001

Tabla 10.3. GLM analisis univariante de los valores de PLS1 entre bloques (base craneal bloque 1 y maxilares bloque 2) y deformación.

Source	SS	DF	MS	F	p
Intercept	14407·10 ⁻⁶	1	14407·10 ⁻⁶	1.553	0.214
Deformation	17913·10 ⁻⁶	2	8956·10 ⁻⁶	0.966	0.383
Block PLS1	4606·10 ⁻⁶	1	4606·10 ⁻⁶	0.497	0.482
Defor x BlockPLS1	1850·10 ⁻⁶	2	927·10 ⁻⁶	0.100	0.901
Error	10157·10 ⁻⁶	170	930·10 ⁻⁶		

grupos. La carga negativa de los deformados del grupo C recoge la rotación de la sínfisis mandibular y las rotaciones y compresiones de la base muy similares a las variaciones descritas para el PC1-. La carga positiva en los grupos con deformación antero-posterior y control muestra una morfología braquicefalica con crecimiento horizontal y rotación hacia delante de la mandibula (Fig. 10.5). El test de permutación Mantel (10,000 permutaciones) para las distancias Procrustes entre los grupos mostró una diferencia significativa ($P < 0.0001$) entre todos los grupos (Tabla 10.1).

El DFA también mostró que no hay ningún cráneo que esté mal clasificado ex visu, con una seguridad de $P < 0.0001$. Los caracteres propios de cada deformación son altamente discriminantes. No hay especímenes atípicos.

Los patrones morfológicos se observan de manera gráfica en los diagramas de deformación (*wireframes*) de superposición entre las medias DFA (Klingenberg, 2011) (Fig. 10.6, 10.7, 10.8).

Base craneal: se distinguen tres zonas de intensa afectación morfológica:

(1) En el polo anterior se produce una rotación hacia arriba y atrás de la lamina cribrosa, desplazamiento hacia atrás del nasion y glabella junto con la órbita, este cambio es más pronunciado en el grupo C (Fig 10.6).

(2) El clivus rota hacia delante y abajo, la sella se desplaza hacia delante (más en el grupo C). El plano maxilar posterior (PM) se desplaza hacia delante. Se produce una compresión antero-posterior de la fosa craneal anterior y de la fosa craneal media. (Fig 10.6).

(3) Se produce una elongación antero-posterior del *foramen magnum* que se asocia a un desplazamiento hacia arriba y atrás de la escama del occipital más pronunciada en el grupo AP (Fig 10.8). Se produce un cierre del ángulo clivo-foraminal. La crista temporalis se desplaza hacia abajo y hacia delante en el grupo AP (Fig 10.7).

Mandíbula: La alteración de la fosa craneal media conlleva un desplazamiento hacia delante del cóndilo. Compresión de anchura de la rama. Incremento en longitud de la rama debida a la post-rotación del cuerpo mandibular (más pronunciada en AP) (Fig 10.7). Post-rotación de la



sínfisis con aumento de espesor e incremento de dimensión vertical del cuerpo (más pronunciado en grupo C). No se produce prognatismo en ninguno de los ADC (Fig 10.8).

El análisis de PLS en la totalidad de la muestra mostró una alta integración entre la base craneal y los maxilares (Fig. 10.9; Tabla 10.2) y como se puede observar en la representación grafica de la fig. 10.9, en los tres grupos el patrón de integración es bastante similar.

El coeficiente RV, que representa la fuerza de covariación entre los dos bloques estudiados, presenta unos valores que muestran una alta interacción entre ambas estructuras (Klingenberg, 2013), tanto en el PLS de la muestra total como en cada uno de los grupos por separado (Tabla 10.2). El PLS1 recoge mayoritariamente el patrón de integración entre ambos bloques con un 85.3% de la covarianza. El alto grado de covarianza entre ambos bloques, tanto en la muestra total como en cada uno de los grupos, queda evidenciado por el test de permutación que muestra una alta significación en los valores singulares en contra de la hipótesis nula de independencia entre bloques. En los valores del test de permutación de correlación se observa un valor de P mayor en el grupo C, y una menor proporción de carga del patrón de integración en el PLS1 (62%). Se observan valores más bajos de porcentaje de covarianza en los grupos deformados, pero hay una mayor correlación en comparación con el grupo no deformado. El GLM análisis univariante llevado a cabo entre los valores de ambos bloques del PLS1 y teniendo en cuenta la deformación (Tabla 10.3), ratificó la ausencia de diferencias en los patrones de integración entre los grupos y la ausencia de interacción con la deformación.

En su extremo negativo, los patrones de integración muestran la asociación entre una rotación de la base craneal anterior hacia arriba y atrás, compresión de la fosa craneal media y posterior con una post-rotación mandibular y un patrón dolicofacial similar al recogido por el PC1-. En el polo positivo del espectro del PLS1 se observa el patrón braquifacial con ante-rotación mandibular y rotación horaria de la base craneal anterior.

Con los resultados obtenidos se puede afirmar que se rechazan las dos primeras hipótesis de partida y se acepta la tercera.

10.1.2 RESULTADOS MAXILAR

El 66% de la varianza total queda recogida en los primeros 8 componentes principales (PC). La inflexión de la curva de eigenvalues se produce en el PC5 con una varianza acumulada del 54%. (Fig. 10.10) El PC5 es el último PC que presenta una varianza por encima del 5% (6.2%) por tanto, el resto de Pcs se pueden considerar poco

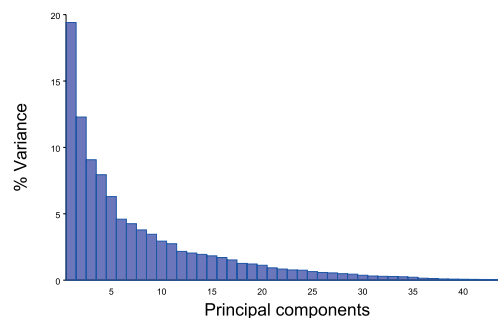


Fig.10.10 Representación de los *eigenvalues* de los PCs. Distribución de la varianza.

relevantes para la diferenciación de los grupos (Zelditch *et al.*, 2004).

El PC1 acumula el 20% de la varianza y separa significativamente ($P < 0.001$) al grupo AP del grupo control y al grupo C del AP. El PC1 muestra cambios de forma en el polo anterior y posterior de la base craneal, con pocas alteraciones del clivus. Muestra también la rotación del plano maxilar y en la apófisis alveolar.

El PC2 acumula el 12% de la varianza y separa significativamente al grupo AP del grupo control ($P < 0.001$) y al con deformación circunferencial del grupo control ($P < 0.015$). El PC2 recoge los cambios de forma en el desplazamiento anterior del clivus, cambios en el polo anterior y polo posterior de la base craneal, rotación del techo orbital y variaciones en la dimensión

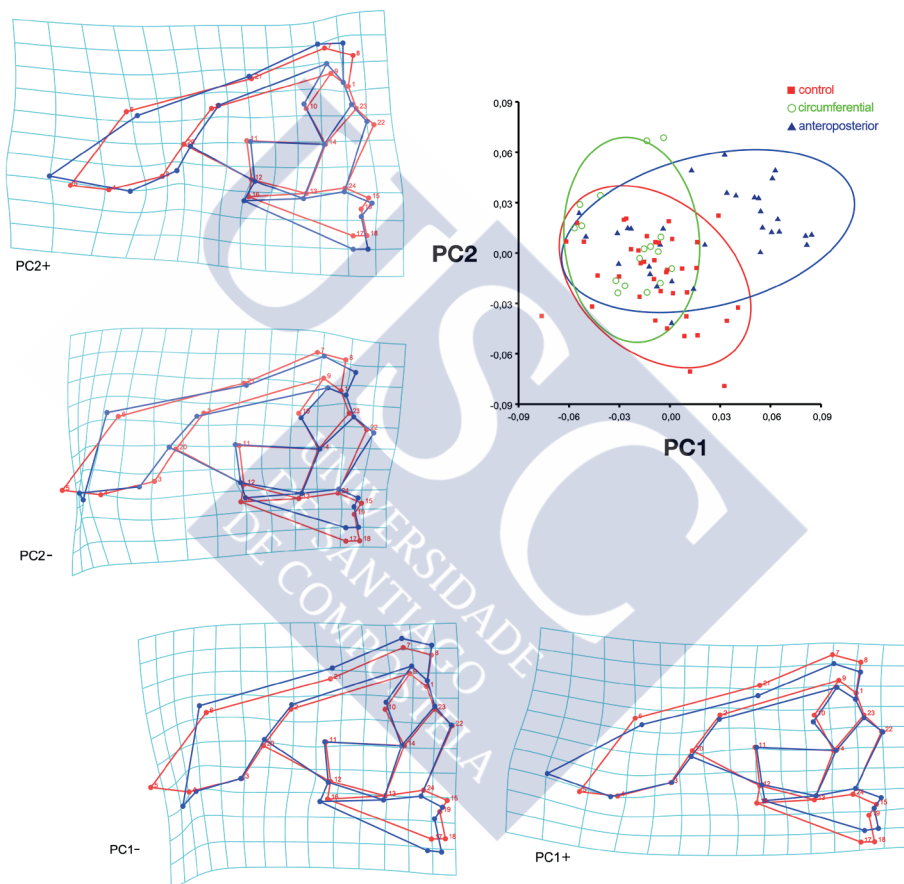


Fig.10.11 Diagrama de dispersión (elipses con 80% de confianza) del primero y segundo componentes principales (PC1 y PC2) (deformación antero-posterior [AP], triángulos azules; deformación circunferencial [C], círculos verdes; control [U], cuadrados rojos) y rejillas de transformación *Thin-plate Spline* con cambios en los vectores de forma para los valores positivos y negativos de los correspondientes PCs. Obsérvese los *wireframes* de los PCs y las rejillas de transformación con las tendencias de cambios morfológicos. En rojo la estructura con los valores neutros y en azul la estructura +/- valores extremos”

vertical maxilar. La combinación de PC1 y PC2 separa morfológicamente a los tres grupos (Fig. 10.11).

El PC3 está asociado con la protrusión maxilar y retrusión frontonasal y orbitaria. Separa al grupo C del grupo control ($P < 0.001$) y recoge el 9% de la varianza. El PC4 separa a los dos

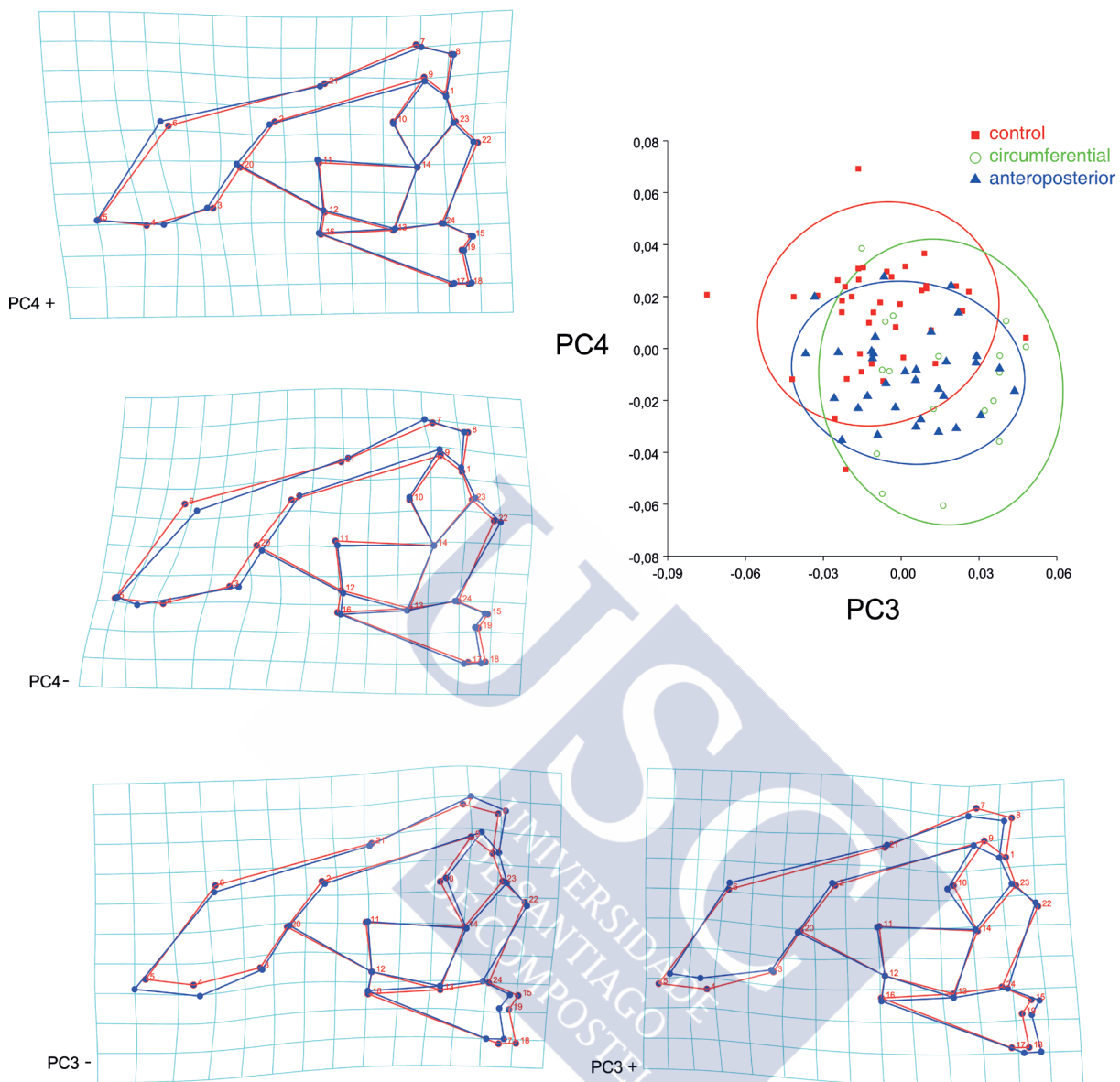


Fig. 10.12 Diagrama de dispersión (elipses con 90% de confianza) y representación *Thin-plate Spline* (TPS) de la transformación del tercero y cuarto componentes principales (PC3 y PC4). Deformación Anteroposterior (AP): Triángulos azules; Deformación Circunferencial (C): círculos verdes; Control (U): cuadrados rojos.

grupos deformados (C y AP) del grupo control (U) (significación $P < 0.001$) pero solo recoge el 7.8% de la varianza total, los cambios más relevantes son en la base craneal media, base craneal posterior y zona nasal (Fig. 10.12).

El estudio de CVA (Fig. 10.13) definió dos ejes que separan la variación morfológica de la muestra. El CV1 (con el 56.2% de la varianza) muestra que el polo anterior y el posterior de la base craneal y el maxilar en sus dos extremos, anterior y posterior, son los elementos que más discriminan en la deformación. La carga negativa es propia de la deformación C y del grupo control y la positiva del grupo AP. La carga positiva refleja los cambios en la fosa craneal posterior, la retrusión frontonasal y la protrusión maxilar.

El CV2, (con el 43.7% de la varianza), separa a los C de los otros dos grupos. La carga posi-

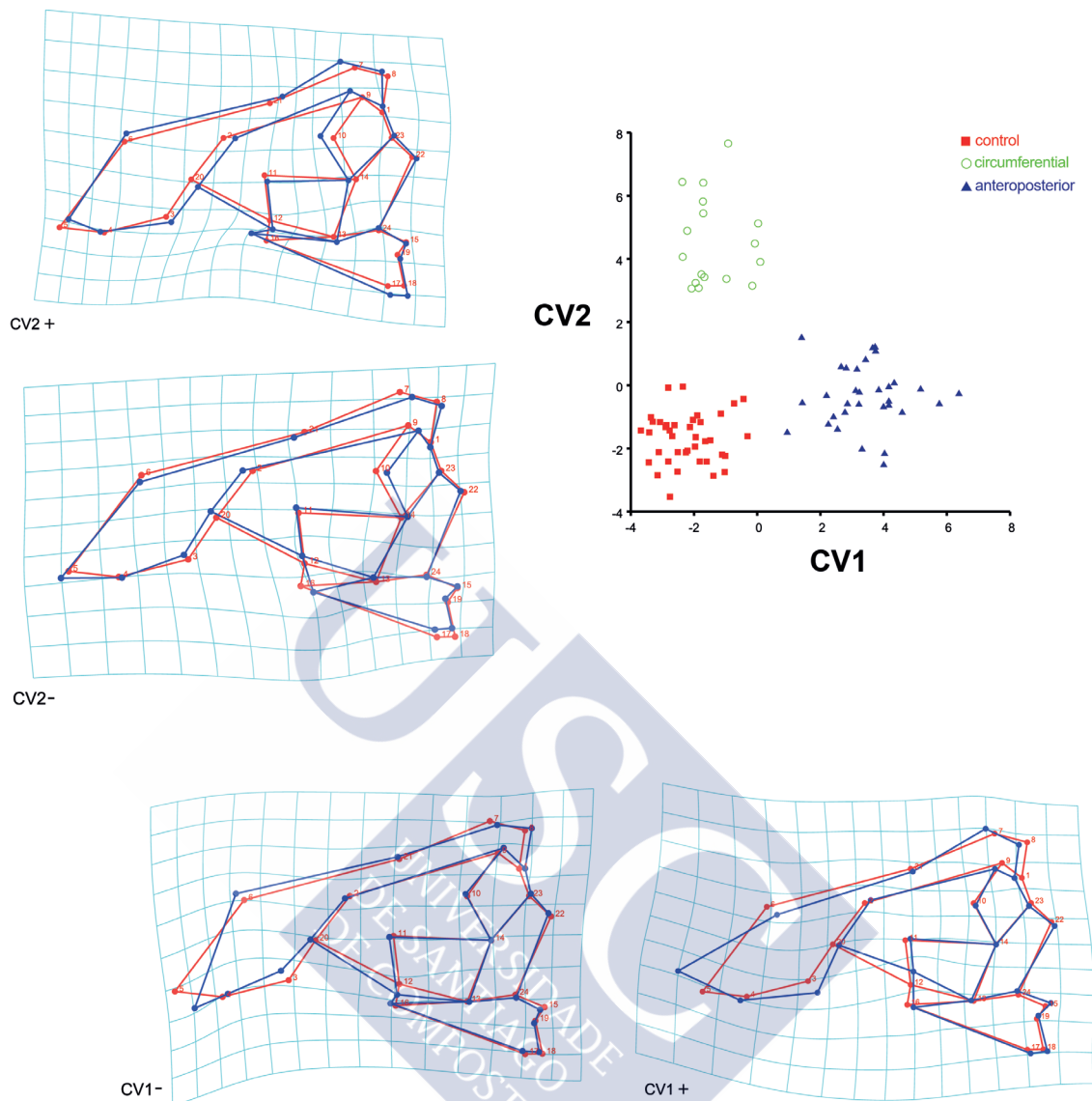


Fig. 10.13 Diagrama de dispersión del análisis de variantes canónicas (CVA) (deformación antero-posterior [AP], triángulos azules; deformación circunferencial [C], círculos verdes; control [U], cuadrados rojos). Los tres grupos son claramente diferenciados. La variación de forma a lo largo del eje correspondiente es visualizada por las transformaciones *Thin-plate Spline*. En rojo la estructura con los valores neutros y en azul la estructura +/- valores extremos. Las estructuras muestran los rasgos que separa a los tres grupos con mayor discriminación.

tiva del grupo circunferencial (C) hace referencia a la rotación del maxilar superior (ante-rotación), al desplazamiento hacia arriba y atrás de la fosa craneal anterior y al desplazamiento del

Tabla 10.4 Distancias Procrustes y P valores para los testes de permutacion de Procrustes entre grupos.

	control	circunf.
circunf.	0.0625 [P<0.0001]	
ant-post	0.0600 [P<0.0001]	0.0651 [P<0.0001]

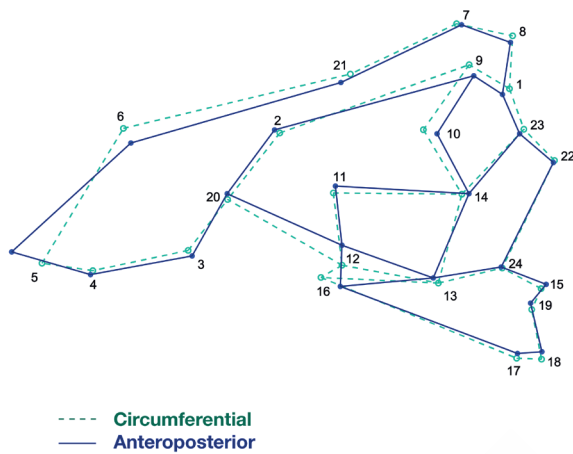


Fig. 10.14 Medias de las diferencias morfológicas reveladas por la función discriminante (DFA); *wireframe* representación del grupo antero-posterior (AP-Azul) y del grupo circunferencial (C-verde). Se han magnificado las diferencias 1.5 veces. Nótese la variación morfológica en la región orbital y nasal, en la escama occipital y en la región de la espina nasal posterior (NPS). Obsérvense las similitudes en el clivus.

clivus hacia delante y abajo. El test de permutación de Mantel (10,000 permutaciones) para las distancias Procrustes entre los grupos dio una diferencia significativa ($P < 0.0001$) entre todos los grupos (Tabla 10.4).

El DFA también mostró que no hay ningún cráneo que esté misclasificado *ex visu*, con una seguridad de $P < 0.0001$. Los caracteres propios de cada deformación son altamente discriminantes.

Los patrones morfológicos se observan de manera gráfica en los *wireframes* de superposición entre las medias DFA (Klingenberg, 2011) (Fig. 10.14, Fig. 10.15, Fig. 10.16).

Alteraciones morfológicas comunes a ambas deformaciones:

Complejo nasomaxilar:

- Incremento de la dimensión vertical anterior, siendo más relevante en el grupo C.
- Desarrollo antero-inferior del proceso alveolar que provoca protrusión del prosthion.
- El punto A se mantiene prácticamente sin variación, mínima protrusion en el grupo C
- Desplazamiento hacia abajo y hacia delante de los huesos nasales.
- Mantenimiento del plano PM con un ligero desplazamiento hacia delante.

Base craneal.

- Desplazamiento y rotación de la lamina cribrosa hacia atrás y arriba, más significativo en el grupo C, esto conlleva un desplazamiento hacia atrás

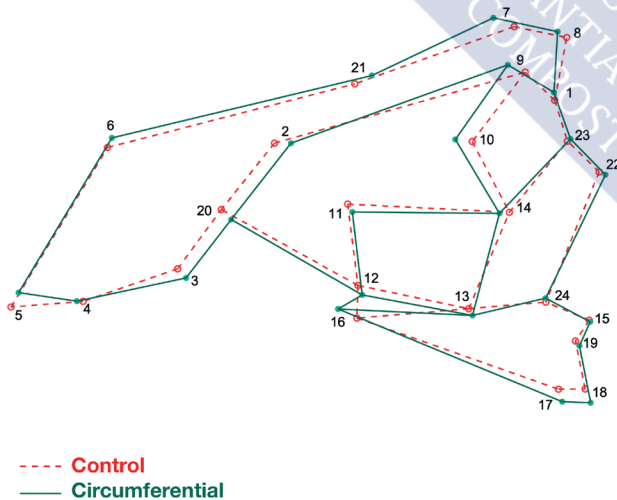


Fig. 10.15 Medias de las diferencias morfológicas reveladas por la función discriminante (DFA); *wireframe* representación del grupo control (U- Rojo) y del grupo circunferencial (C- verde). Las diferencias han sido aumentadas 1.5 veces.

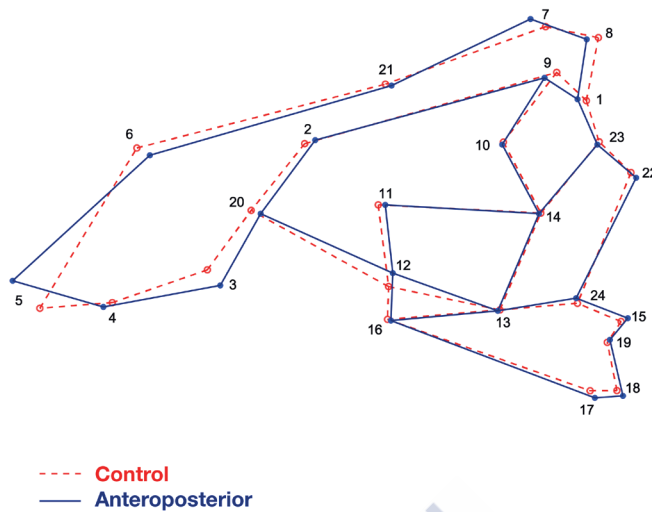


Fig. 10.16 Medias de las diferencias morfológicas reveladas por la función discriminante (DFA); *wireframe* representación del grupo control (U-rojo) y del grupo antero-posterior (AP-azul). Las diferencias han sido aumentadas 1.5 veces.

del techo de la orbita.

-Desplazamiento del clivus hacia delante y abajo.

-Cierre del ángulo clivo-foraminal.

-Aumento sagital del *foramen magnum* y elevación de la escama del occipital.

Alteraciones específicas de grupo.

Grupo con deformación antero-posterior (AP).

Complejo nasomaxilar:

-Desplazamiento hacia atrás del nasion.

-Protrusión de la espina nasal anterior.

-Disminución de la dimensión vertical posterior de la fisura pterygomaxilar

Base craneal:

-Cierre del ángulo de la base craneal.

- Desplazamiento hacia atrás de la escama occipital.

Grupo con deformación circunferencial (C).

Complejo nasomaxilar:

-Desplazamiento hacia atrás y arriba de la órbita.

-Ante-rotación de la maxila.

-Desplazamiento posterior de la espina nasal posterior.

-Post-rotación y desplazamiento inferior del seno maxilar.

Base Craneal:

-Apertura del ángulo de la base craneal.

-Elevación de la crista temporalis.

A la vista de los resultados se procedió a rechazar ambas hipótesis nulas.

10.2 RESULTADOS CEFALOMETRIA CLÁSICA MULTIVARIABLE

El primer componente explica un 35% de la varianza total de la muestra, (tabla 10.5; fig.



Fig. 10.17 - Gráfico de sedimentación - Saturación

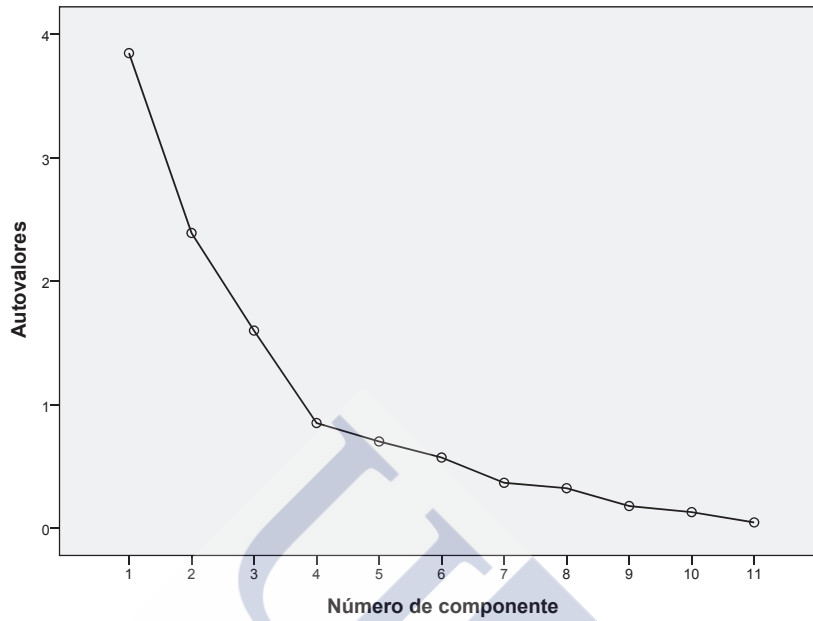


Tabla 10.5 - Varianza total explicada^a (Saturación de la varianza)

Componente	Autovalores iniciales			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación ^b
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total
1	3,847	34,975	34,975	3,597
2	2,390	21,730	56,705	2,685
3	1,599	14,539	71,244	1,851
4	,851	7,733	78,977	
5	,701	6,373	85,350	
6	,571	5,190	90,540	
7	,366	3,330	93,870	
8	,322	2,931	96,801	
9	,178	1,619	98,420	
10	,129	1,169	99,589	
11	,045	,411	100,000	

Método de extracción: Análisis de Componentes principales.

a. Cuando los componentes están correlacionados, las sumas de los cuadrados de las saturaciones no se pueden añadir para obtener una varianza total.

Tabla 10.6 - Matriz de componentes^a

	Componente		
	1	2	3
SBa<BaBo	,428	,401	,773
<N-S-Bo	,210	-,646	-,650
<N-S-Ar	,790	-,312	-,014
<N-S-Ba	,786	-,363	,315
<S-N-A	-,687	-,036	,096
<S-N-B	-,746	-,348	,286
Ptem<PFc	,549	-,300	-,232
<Gn-Go /PFc	,443	,728	-,221
Fca<S-Ba	,781	-,313	,341
<Na-Ba-A	,040	,660	-,170
ENA-XI-Pm Ricketts	,492	,553	-,376

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

a. 3 componentes extraídos

Tabla 10.7 - Matriz de estructura

	Componente		
	1	2	3
<N-S-Ba	,902	,022	,027
Fca<S-Ba	,884	,048	,077
<N-S-Ar	,837	,190	-,217
<S-N-A	-,602	-,429	,085
<Gn-Go /PFc	,104	,869	,209
ENA-XI-Pm Ricketts	,190	,824	-,019
<S-N-B	-,512	-,770	,070
<Na-Ba-A	-,232	,585	,228
<N-S-Bo	,331	-,124	-,908
SBa<BaBo	,363	,232	,848
Ptem<PFc	,578	,155	-,381

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

Metodo de rotación: Normalización Oblimin con Kaiser.



Tabla 10.8 - Matriz de correlaciones de componentes^a

Componente	1	2	3
1	1,000	,151	-,115
2	,151	1,000	,083
3	-,115	,083	1,000

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

Metodo de rotación: Normalización Oblimin con Kaiser.

- a. Sólo aquellos casos para los que NON DEFORM=0 DEFORM=1 = AP, serán utilizados en la fase de análisis.

10.17) presenta una carga significativa de los ángulos que miden la relación de la fosa craneal anterior con la fosa craneal media, presentándose mayor carga en Na-S-Ba y otros ángulos de la base craneal anterior y media. La inclinación de la pared posterior de la fosa media (Ptem^PFc) también tiene una participación relevante en este componente, aunque va a ser una variable

Fig. 10.18 - Gráfico de nube de puntos y centroides PC1-PC2

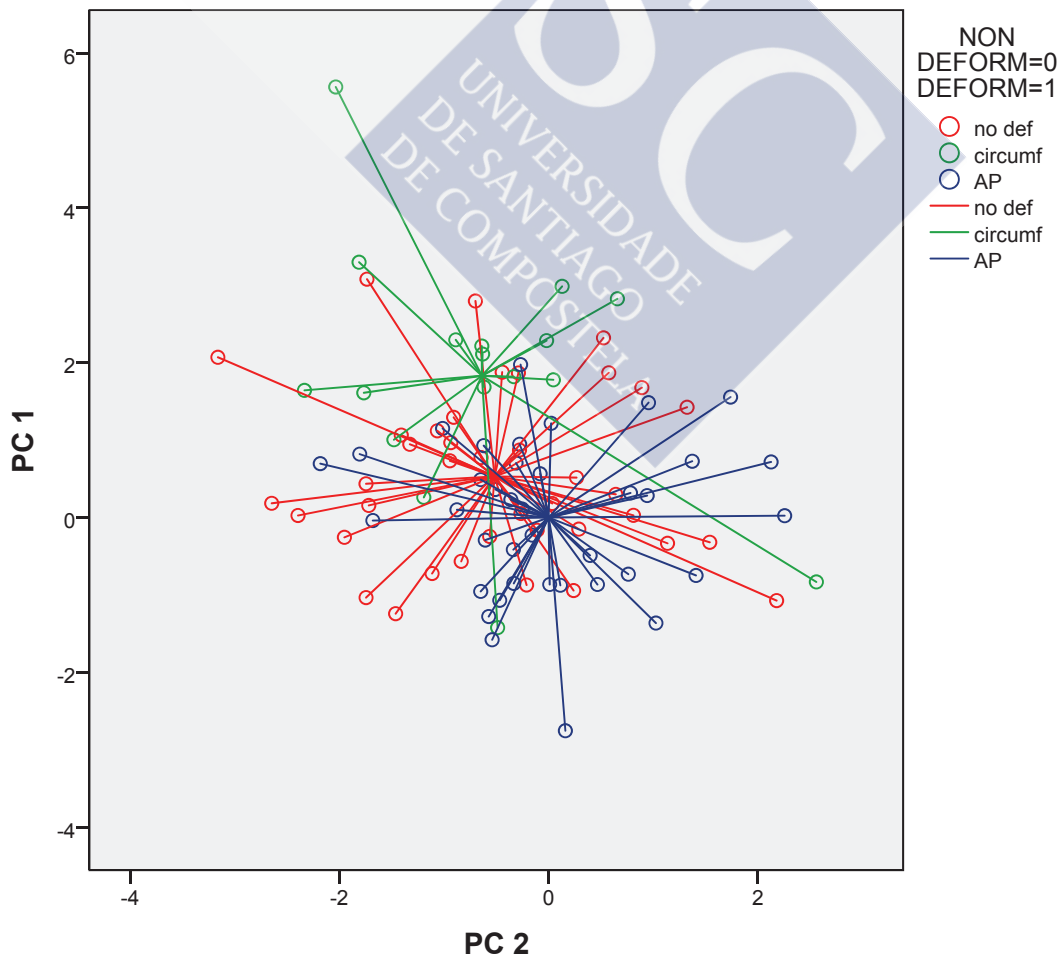
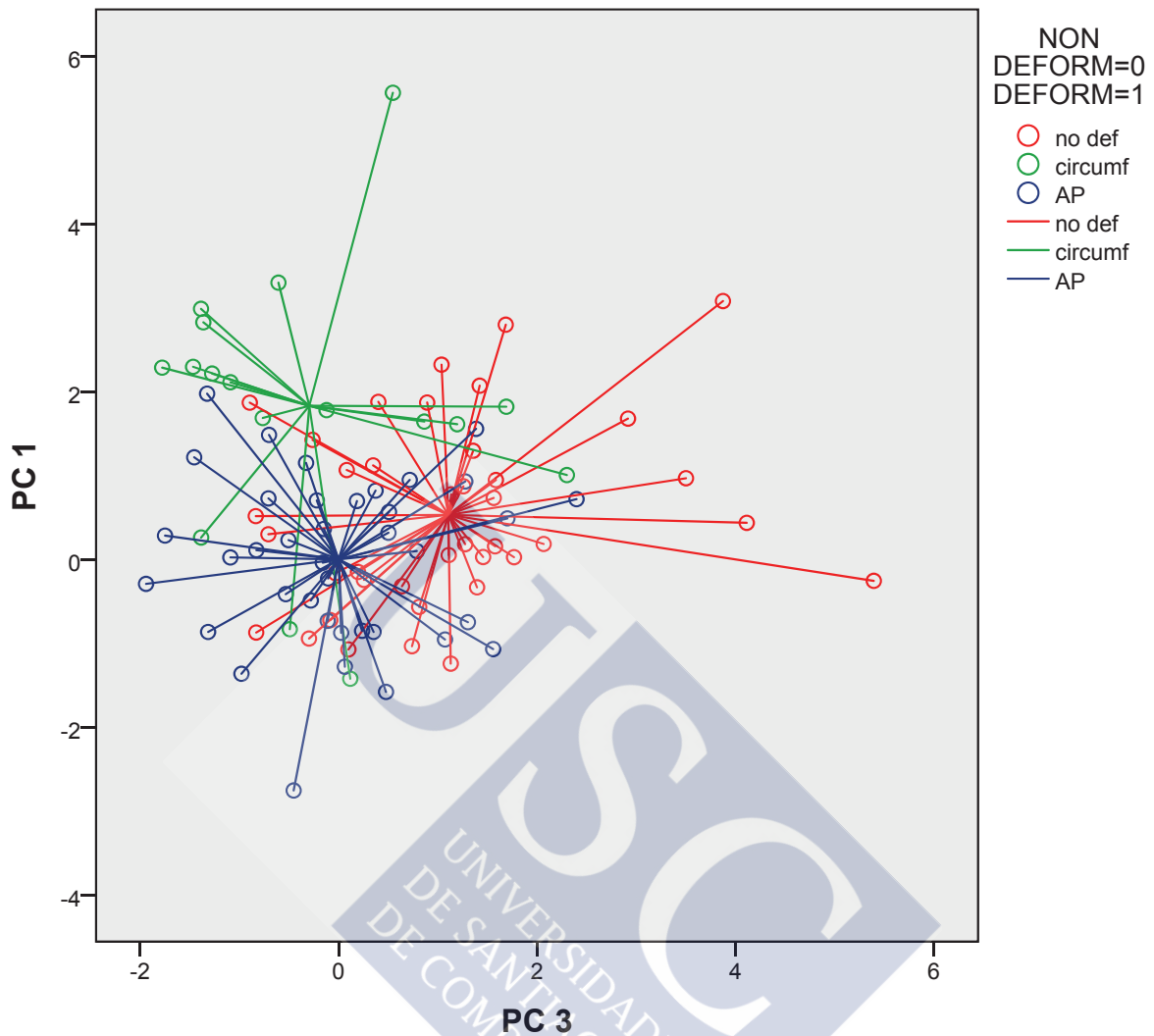


Fig. 10.19 - Gráfico de nube de puntos y centroides PC1-PC3



compleja pues presenta carga también en PC3. Los ángulos S-N-B y S-N-A son variables complejas que van a participar en el PC1 y también en el PC2 (véase su localización espacial semejante en fig. 15.1, Apéndice I). La máxima variación de la muestra está recogida en la alteración de la fosa craneal anterior y su relación con la fosa craneal media y las estructuras maxilares.

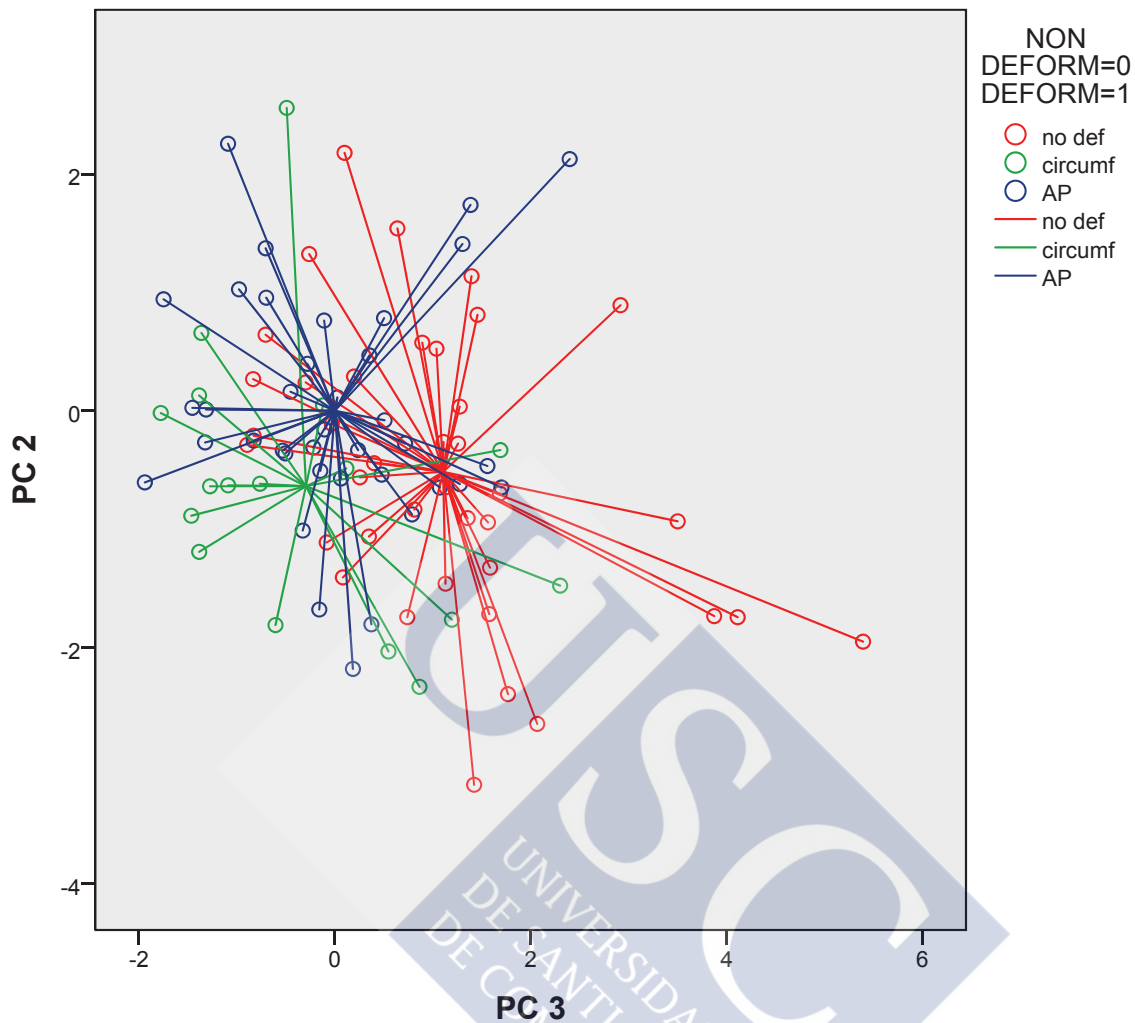
El PC2 explica un 21.7% de la varianza (Tabla 10.5) y está integrado por la variación en la zona de los maxilares, en concreto la variación del ángulo mandibular, la varianza de la dimensión vertical del tercio facial inferior y del complejo naso-maxilar y tiene también un componente de la base craneal posterior (Tabla 10.7).

El PC3 explica el 14.5% de la varianza total (Tabla 10.5) y recoge la variación en la fosa craneal posterior presentando una fuerte participación de la variación a nivel del ángulo clivo-foraminal y consecuentemente su relación con la fosa craneal anterior, También tiene una carga relevante la pendiente del peñasco temporal límite posterior de la fosa craneal media (Tabla 10.7).

El PC1 separa ($p < 0.001$) a los circunferenciales de los AP y de los no deformados (Tabla 15.3, Apéndice I y Fig. 10.18), cargan en positivo los C y en negativo los AP.



Fig. 10.20 - Gráfico de nube de puntos y centroides PC2 - PC3



El PC2, a pesar de recoger una gran variación en la muestra, refleja una fluctuación que no diferencia significativamente a los tres grupos (Tabla 15.3, Apéndice I) como se puede ver en (Fig. 10.18) parece haber una separación entre AP y circunferenciales (C) y no deformados (ND) pero no es significativa.

El PC3 recoge un 14.5% de la varianza total (Tabla 10.5) y junto con el PC1 es el que separa la muestra (Fig. 10.19). Separa los cráneos deformados de los cráneos sin deformar ($p < 0.001$), no es capaz de separar los dos tipos de deformaciones (AP y C). Cargan muy negativo los C, menos negativo los AP y positivo los ND. Con esta información de agrupación de las variables angulares en las variables de los PCs, se llevó a cabo un estudio ANOVA post-hoc Sheffe (Tabla 10.10).

La máxima variación de la muestra que separa a los cráneos está en la base craneal, en concreto los cráneos que presentan mayor alteración son los cráneos C. La deformación provoca platibasia del N-S-Ba en los C y cifosis en los AP (Tabla 10.9; Tabla 10.10). Aunque esta alteración es menos relevante cuando se toma el punto Ar, es decir la pars medialis de la fosa

Tabla 10.9 - PC1 - variables que participan en su composición de forma más relevante

Variable	grupo	Media y SD	Interpretación	Separación p<0.05
PC1				
Na-S-Ba	ND	135±4	Platibasia en C y cifosis en AP C presenta menor SD que Na-S-Ar	ND de C
	AP	131±3		ND de AP
	C	139±6		C de AP
Fca-S-Ba	ND	149±6	Desplazamiento hacia arriba y atrás de la fosa craneal anterior en C y AP. El desplazamiento es mayor en C.	ND de C
	AP	150±3		
	C	154±7		
NSAr	ND	137±5	Platibasia en C y ligera cifosis en AP	ND de C
	AP	136±5,7		C de AP
	C	143±7,2		
Ptem^PFc	ND	15±4	Mayor pendiente de la pared posterior de la fosa media en C y aplanamiento en AP	ND de AP
	AP	8±4		ND de C
	C	21±5		AP de C
SNA	ND	80±4	Descenso de S en C y ascenso en AP	AP de ND
	AP	80±3		AP de C
	C	77±4		
SNB	ND	80±4	No se produce desplazamiento anterior de la mandíbula en deformación. Compensación por descenso de S.	ND de C
	AP	80±3		AP de C
	C	77±4		

craneal media, está más afectada por la deformación que la pars lateralis. La deformación de la base craneal es tanto en el polo anterior como en el polo posterior. La alteración que se produce en SNA y SNB está muy afectada por el ascenso o descenso de la silla turca (Tabla 10.9; Tabla 10.10). La alteración de la fosa craneal anterior es muy evidente en los C. La fosa craneal posterior muestra también una gran alteración (PC3) se produce cifosis del ángulo clivo-foraminal en la deformación, y el opistion asciende en relación a la fosa craneal anterior en ambas deformaciones, más acentuado en los C (Tabla 10.10; Tabla 10.12).

Hay una variación recogida en el PC2 que se centra en la zona facial, no es una varianza de la magnitud del PC1, pero recoge diferencias por ejemplo del plano mandibular entre los C y



Tabla 10.10 - Pruebas post hoc - Comparaciones múltiples.

Scheffé

Variable dependiente	(I) NON DEFORM=0 DEFORM=1	(J) NON DEFORM=0 DEFORM=1	Diferencia de medias (I-J)	Sig.
SBa<BaBo	no def	circumf	7,575*	,044
		AP	11,877*	,000
	circumf	no def	-7,575*	,044
		AP	4,302	,361
	AP	no def	-11,877	,000
		circumf	-4,302	,361
<N-S-Bo	no def	circumf	-6,573*	,000
		AP	-1,892	,234
	circumf	no def	6,573*	,000
		AP	4,681*	,005
	AP	no def	1,892	,234
		circumf	-4,681*	,005
<N-S-Ar	no def	circumf	-6,465*	,002
		AP	,438	,950
	circumf	no def	6,465*	,002
		AP	6,902*	,001
	AP	no def	-,438	,950
		circumf	-6,902*	,001
<N-S-Ba	no def	circumf	-3,535*	,038
		AP	4,115*	,001
	circumf	no def	3,535*	,038
		AP	7,650*	,000
	AP	no def	-4,115*	,001
		circumf	-7,650*	,000
<S-N-A	no def	circumf	,646	,840
		AP	-2,563*	,014
	circumf	no def	-,646	,840
		AP	-3,209*	,017
	AP	no def	2,563*	,014
		circumf	3,209*	,017
<S-N-B	no def	circumf	3,139*	,035
		AP	,125	,991
	circumf	no def	-3,139*	,035
		AP	-3,014*	,047
	AP	no def	-,125	,991
		circumf	3,014*	,047
Ptemp<PFc	no def	circumf	-6,665*	,000
		AP	6,239*	,000
	circumf	no def	6,665*	,000
		AP	12,904*	,000
	AP	no def	-6,239*	,000
		circumf	-12,904*	,000

Tabla 10.10 - Continuación.

<Gn-Go /PFc	no def	circumf	-5,321*	,009
		AP	-2,484	,174
	circumf	no def	5,321*	,009
		AP	2,837	,248
	AP	no def	2,484	,174
		circumf	-2,837	,248
Fca<S-Ba	no def	circumf	-4,430*	,039
		AP	-,393	,958
	circumf	no def	4,430*	,039
		AP	4,037	,068
	AP	no def	,393	,958
		circumf	-4,037	,068
<Na-Ba-A	no def	circumf	-2,670*	,002
		AP	-1,609*	,020
	circumf	no def	2,670*	,002
		AP	1,060	,341
	AP	no def	1,609*	,020
		circumf	-1,060	,341
ENA-XI-Pm Ricketts	no def	circumf	-3,593*	,028
		AP	-2,559	,052
	circumf	no def	3,593*	,028
		AP	1,034	,738
	AP	no def	2,559	,052
		circumf	-1,034	,738

*la diferencia de medias es significativa a nivel 0,05.

los ND, con un componente más vertical en los C (Tabla 10.10; Tabla 10.11). Hay un incremento de la dimensión vertical del complejo naso-maxilar y del tercio facial inferior en los cráneos con deformación respecto a los ND. Este componente vertical es mayor en C que en AP (Tabla 10.10; Tabla 10.11).

Tabla 10.11 - PC2 - variables que participan en su composición de forma más relevante

Variable	grupo	Media y SD	Interpretación	Separación p<0.05
PC2				
Gn-Go-PFc	ND	19±6	Tendencia dólico de cuerpo mandibular en C, AP no llega a ser significativo.	ND de C
	AP	22±5		
	C	25±7		
ENA-Xi-B	ND	39,2±4	Incremento de la dimensión vertical del tercio inferior facial.	ND de AP
	AP	41±4		ND de C
	C	42±4		
Na-Ba-A	ND	34±2	Incremento de la dimensión vertical del complejo nasomaxilar.	ND de AP
	AP	36±2		ND de C
	C	36±3		



Tabla 10.12 - PC3 - variables que participan en su composición de forma más relevante

Variable	grupo	Media y SD	Interpretación	Separación p<0.05
PC3				
N-S-Op	ND	147±5	Elevación del opistion en deformación más evidente en C, diferencia no significativa en AP	ND de C
	AP	149±4		AP de C
	C	154±5		
S-Ba^BaOp	ND	147±11	Cifosis del ángulo clivo-foraminal en la deformación. Más acentuada en AP	ND de AP
	AP	135±9		ND de C
	C	140±8		

Aquellas variables angulares que separan la deformación de la no deformación, podemos decir que son de mayor a menor rango:

N-S-Ba, este ángulo tiene tendencia a mostrar cifosis en la deformación AP y a mostrar platibasia en la deformación C.

S-Ba^Ba-Op, se tiende a producir cifosis clivo-foraminal en la deformación.

Ptemp^PFc, se presenta una mayor pendiente en los deformados C y aplanamiento en la deformación AP.

Se produce un incremento de la dimensión vertical facial del tercio medio e inferior en los deformados por tanto incremento en: N-Ba-A y ENA-Xi-B.





11. DISCUSIÓN





11.1 MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA

11.1.1 BASE Y MANDÍBULA

Un aspecto polémico en la literatura ha sido la influencia de la forma de la base craneal en la posición de la mandíbula, si bien algunos estudios no han mostrado relación entre la forma de la base craneal y la posición mandibular (Chang *et al.*, 2005; Dhopatkar *et al.*, 2002; Lieberman *et al.*, 2000; Hildwein *et al.*, 1986; Varrela, 1993,1998; Kasai *et al.*,1995; Wilhelm *et al.*, 2001; Bastir y Rosas, 2005), otros estudios han mostrado que el cierre de la flexión de la base craneal está asociado a prognatismo mandibular (Proff *et al.*, 2008; Polat y Kaya, 2007) y que la apertura de la flexura se asocia a disto-oclusión (Anderson y Popovich, 1983; Kerr y Adams, 1988; Klocke, 2002).

En este trabajo se ha observado que la deformación provoca un cambio de forma y orientación de la base craneal significativo. Las alteraciones en la orientación de la base son diferentes dependiendo del tipo de deformación craneal, confirmando lo descrito por otros autores (Moss, 1958; McNeill y Newton, 1965; Anton, 1989). La mandíbula sufre un desplazamiento en los cráneos deformados, presentando una rotación de la matriz y una rotación intramatriz (Bjork y Skieller, 1983). Hay una rotación horaria de la sínfisis y cuerpo de la mandibula. Existe un cambio de posición hacia delante del cóndilo y un crecimiento hacia abajo y atrás de la sínfisis pero sin que se produzca prognatismo mandibular (particularmente evidente en el grupo C).

El análisis de GM, presenta ventajas significativas respecto a los métodos cefalométricos tradicionales, especialmente los univariados, el aspecto más relevante es la posibilidad de observar el movimiento en bloque de todas las estructuras y su cambio de posición (Singh *et al.*, 1997; Rosas *et al.*, 2008; Wellens *et al.*, 2013; Bookstein, 1991; Zelditch *et al.*, 2004). Se emplearon tanto en la base como en la mandíbula puntos de línea media y puntos laterales (Singh *et al.*, 1997), es importante tener en cuenta que algunos autores han sugerido que debido a un desarrollo más tardío de la base craneal lateral [en contacto con matrices funcionales faciales (Enlow y Hans, 1996; Lieberman *et al.*, 2000)], la verdadera interfaz entre neurocráneo y viscerocráneo se halla en la base craneal lateral y no en la base craneal media (Bastir y Rosas, 2006). Esto explicaría, en parte, los contradictorios resultados presentes en la literatura entre la correlación de la flexura de la base craneal y la posición de la mandíbula (Oetteking, 1924; Moss, 1958; McNeill y Newton, 1965; Anton, 1989; Ogura, 2006). La inclusión de *landmarks* mediales y laterales nos permite observar cuáles son las estructuras de la base craneal que se ven más afectadas por la deformación y cuáles son las que realmente influyen en el despla-



miento mandibular.

11.1.2 CLIVUS Y MANDÍBULA

El aparato deformador afecta de manera directa al desarrollo de la base craneal (Oetteking, 1924; Moss, 1958; McNeill y Newton, 1965; Anton, 1989; Cheverud *et al.*, 1992; Ogura, 2006; Jimenez *et al.*, 2012). Como se ha visto se produce una rotación de la *pars medialis* de la base craneal anterior, siendo el pivote de rotación el *landmark wing* (fusión del ala esfenoidal con la base). En el clivus se produce un desplazamiento hacia delante y hacia abajo (Cheverud *et al.*, 1992).

La estabilidad del plano sella-basion respecto a la horizontal (FH) descrita por Anton (1989) no parece tener fundamento especialmente en los cráneos con deformación anteroposterior. El desplazamiento del clivus en la línea media se acompaña de una elongación de la distancia sella basion, lo cual implica una alteración indirecta de la sincondrosis esfeno-occipital por la deformación. La elongación del clivus debería conllevar una posición más distal de la mandíbula (Hopkin *et al.*, 1968; Klocke, 2002, Proff *et al.*, 2008; Andria *et al.*, 2004) que, en estos cráneos, no se produce. El desplazamiento anterior del clivus se ve acompañado del desplazamiento de estructuras laterales localizadas en la fosa craneal media, es decir, la fosa glenoidea (condilar posterior y el condylion) se desplazan hacia delante, pero no hacia abajo, a pesar del desplazamiento del basion (Fig 10.6, 10.7, 10.8). Esta diferencia refuerza la idea de que la base craneal lateral está más integrada con las estructuras del viscerocráneo (Bastir y Rosas, 2006). Esta posición más anterior de la fosa glenoidea debería corresponderse con un cierre del ángulo de la base y con prognatismo mandibular (Proff *et al.*, 2008; Polat y Kaya, 2007; Hopkin *et al.*, 1968) que en los ADC estudiados no se produce. La mayoría de los trabajos precedentes han hallado platibasia en los cráneos deformados (Oetteking, 1924; McNeill y Newton, 1965; Anton, 1989; Ogura, 2006), salvo Moss (1958) que halló cifosis. El clivus queda modificado, a pesar de que el cierre de la sincondrosis esfeno-occipital no se produce hasta pasados los 12 años (Hoyte, 1991). En el presente estudio, a pesar del desplazamiento del clivus, no se produce un cambio sustancial en la flexura de la base (Rosas *et al.*, 2008), el avance y rotación del clivus se ve compensado por la rotación anti-horaria de la base craneal anterior. Este relevante desplazamiento de la base anterior ya había sido descrito en cráneos deformados (McNeill y Newton, 1965; Anton, 1989) y se produce por el desplazamiento hacia atrás y arriba de la lámina cribosa, del nasion y de la glabella. La rotación se acompaña de compresión de la base craneal anterior que en estos cráneos, a diferencia de lo descrito en sujetos normales (Hopkin *et al.*, 1968; Dibbets, 1996; Kerr y Adams, 1988; Tanabe *et al.*, 2002; Rosas *et al.*, 2008), no se asocia a prognatismo mandibular. Es importante resaltar que la constricción antero-posterior también ocurre en la base craneal media, manteniéndose como estructuras más estables la interfaz entre ellas, el

plano maxilar posterior (PM), confirmándose de esta manera la estabilidad de esta columna facial posterior (Enlow y Hans, 1996) como frontera entre dos estructuras modulares verticales que sufren la deformación de forma independiente (Bastir y Rosas, 2005; Wellens *et al.*, 2013).

La alteración en la fosa craneal posterior difiere en los dos tipos de cráneos deformados: el relieve del peñasco del temporal se aplanan en los cráneos con deformación AP con una rotación hacia delante del ápex del peñasco y una elevación de la escama del occipital. En los cráneos C la compresión de la escama del occipital es mayor y no se aplanan el peñasco del temporal. En todos los ADC estudiados se ha observado una elongación sagital del *foramen magnum*. Se produce el desplazamiento antero-inferior del basion pero el punto de Bolton se mantiene estable, este aspecto ya había sido descrito por otros autores (McNeill y Newton, 1965; Anton, 1989).

Parecen definirse tres zonas verticales especialmente sensibles a la deformación en la base craneal, una en torno al *foramen magnum*, otra conformada por la sincondrosis esfeno-occipital y la otra en la sutura esfeno-etmoidal. El aparato deformador se mantenía los 5 primeros años (Cieza, 1932) en este tiempo se producen las restricciones sobre los centros de crecimiento y la deformación compensadora (Bjork, 1955; Moss, 1958; Hoyte, 1991) estas modificaciones se propagan hacia el viscerocráneo en desarrollo.

11.1.3 MANDÍBULA

Se produce una rotación de la matriz mandibular (Bjork y Skieller, 1983) con rotación posterior e incremento de la dimensión vertical anterior, la rama se ve desplazada hacia delante en una rotación intramatriz. También se produce una rotación intramatriz del cuerpo, con una remodelación de la sínfisis, incrementándose su altura. La mandíbula figura como una de las grandes fuentes de variación, así se puede constatar en los scores de los PC (Fig. 10.2). La CV2, con un 28% de la varianza, recoge la rotación total de la mandíbula, pero especialmente aquellas alteraciones a nivel del cuerpo y sínfisis más relevantes en la deformación C. La CV1, con el 71% de la varianza, se centra más en los cambios en la rama. La rama experimenta un incremento de longitud ya apuntado por otros autores (Jimenez *et al.*, 2012) y una disminución de anchura. La rama desempeña un papel secundario en el desarrollo, es un elemento de unión entre el plano oclusal del cuerpo y la base del cráneo (Moss, 1971; Enlow y Hans, 1996), y es un elemento compensador (Bjork y Skieller, 1983). El cuerpo, la matriz funcional oclusal y la posición de la fosa glenoidea son los que determinan la longitud y posición de la rama. De hecho en los ADC estudiados en el presente trabajo el desplazamiento de la rama hacia delante no se ve acompañado de prognatismo. Esta relativa independencia entre la rama y el cuerpo refuerza la idea de distintos módulos integrados en la matriz de la mandíbula (Moss, 1971). El análisis de GM permite, a diferencia del estudio de los ángulos, visualizar los movimientos de cada estructura, conocer las zonas que sufren mayor alteración y el sentido del cambio de forma



(Singh *et al.*, 1997). El análisis de contraparte prolonga el plano maxilar posterior separando en la mandíbula el cuerpo y la rama (Enlow y Hans, 1996). La interfaz entre estas dos estructuras pasa por la fosa retromolar que sufre en estos cráneos una alteración mínima, propia de una zona fronteriza entre módulos. El ángulo mandibular, a diferencia de lo hallado por Ogura *et al.*, (2006), no sufre cambios, las diferencias se centran en el acortamiento anteroposterior de la mandíbula (Kohn *et al.*, 1993) con disminución de la anchura de la rama. Esta relación entre base craneal media y rama ha sido ya descrita como una posible unidad modular (Scott, 1967; Bastir y Rosas, 2005). Es importante tener en cuenta que tradicionalmente se ha considerado el espacio faríngeo estrechamente relacionado con la morfogénesis de la base craneal (Hoyte, 1991; Sperber *et al.*, 2001). La contracción antero-posterior de la rama mandibular por desplazamiento anterior del borde posterior hallado en el presente trabajo y la alteración descrita en la fosa craneal media, se correlaciona con la compresión del espacio faríngeo ya hallado por otros autores (Jimenez *et al.*, 2012) en la deformación AP. Lo realmente llamativo es que, a diferencia de lo descrito en la literatura (Proff *et al.*, 2008; Polat y Kaya, 2007; Hopkin *et al.*, 1968), no se produce la protrusión mandibular que cabría esperar con un desplazamiento anterior de los cóndilos. El prognatismo mandibular, ni siquiera en estos casos que presentan una gran compresión del condrocraqueo, depende de forma unívoca de la base craneal y de la aposición de hueso en la porción anterior de los huesos maxilares y mandibulares como había propuesto Scott, (1967). Tampoco se produce el efecto de compensación descrito por Anderson y Popovich, (1983) pues no hay rotación de la matriz de la rama, y la fosa craneal anterior en su desplazamiento pierde la correlación con el borde posterior de la rama propuesto por estos autores en los sujetos con tendencia prognata.

11.1.4 INTEGRACIÓN MANDÍBULA

En realidad, estos cráneos con deformación intencional son un “experimento natural” (Anton, 1989; Cheverud *et al.*, 1992; Lieberman *et al.*, 2000) en el que se puede estudiar cómo se producen compensaciones en el mosaico de módulos que integran el cráneo como respuesta al intenso proceso de deformación. Este suceso también permite ver hasta qué punto hay una estrecha integración entre las diferentes unidades craneales. Algunos autores opinan que las dos grandes hipótesis de desarrollo craneofacial representan dos concepciones polares pero a su vez complementarias (Bastir y Rosas, 2005; 2006). La FMH (Moss, 1971; 1997) presentaría una visión integradora funcional y el análisis de contrapartes (Enlow y Hans, 1996) defendería una visión más modular pero dentro de un sistema integrado. En el presente estudio se ha visto que hay aéreas que se comportan con cierto grado de autonomía frente a la agresión que supone la deformación, pero siempre dentro de un patrón de integración general. La deformación de la



bóveda afecta significativamente a la base y a la mandíbula, incluso a zonas de la mandíbula tan distantes como la sínfisis, pero, al ser un proceso multifactorial, hay aspectos, como el prognatismo mandibular que no se manifiestan, que quedan atenuados, o contenidos por la función masticatoria, que como factor externo, tendría gran relevancia en el desarrollo de estos huesos (Carlson y Van Gerven, 1977; Kiliaridis *et al.*, 1995; Varrela, 1998). Es conocido también que la ontogénesis de los huesos craneales que provienen de osificación desmal, es más sensible a los factores externos (Lieberman *et al.*, 2000; Gkantidis y Halazonetis, 2011) y que la maduración más tardía de la fosa craneal lateral y de la cara, ambas con origen desmal, conduce a una estrecha integración entre estas estructuras (Bastir y Rosas, 2005; 2006). Es posible que la ausencia de prognatismo se deba en parte al correcto funcionamiento del sistema estomatognático, al mecanismo de compensación dento-alveolar (Solow, 1980) y, a que el patrón de crecimiento facial de estos sujetos no era Clase III.

El cráneo es un sistema multimodular estrechamente integrado, con muchos aspectos de su ontogénesis desconocidos por el momento. Es muy posible que la integridad de la cápsula circumoral (Moss, 1971; 1997) y la oclusión jueguen un papel relevante en la disposición del cuerpo mandibular, superponiéndose a otros condicionantes de la morfogénesis. Es muy atractiva la teoría del palimpsesto, propuesta recientemente [Hallgrímsson *et al.*, 2007(b)], en la que se defiende un patrón inicial integrador predeterminado que se va modificando y reescribiendo dependiendo de los factores externos, de la expresión de constricciones genéticas, de la función y de la interacción entre los módulos. En este patrón se mantiene siempre una integración ineludible que garantizaría la función y el desarrollo de una estructura tan compleja (Martínez-Abadías *et al.*, 2009).

11.1.5 BASE Y MAXILA

Los resultados del presente trabajo muestran que los dos tipos de deformación craneal (antero-posterior y circunferencial) provocan alteraciones morfológicas a nivel de la base craneal y que estas alteraciones se propagan al complejo nasomaxilar (NMC). Así, se verifica que son afectadas unidades anatómicas tan lejanas de la deformación inicial como el maxilar superior.

Las dos variedades de deformación de la bóveda provocan alteraciones morfológicas diferentes de la base craneal y del complejo nasomaxilar. Como se ha expuesto con anterioridad, en la mayor parte de los estudios no se ha empleado la geometría morfométrica (GMA) para el estudio de la deformación craneal intencionada. Este tipo de análisis permite la visualización conjunta de los cambios morfológicos de toda una estructura anatómica, y facilita localizar aquellas subunidades o, incluso, zonas de sus subunidades en las que el cambio es mayor (Zelditch *et al.*, 2004; von Cramon-Taubadel *et al.*, 2007; Klingenberg, 2011; Adams *et al.*, 2013) pues nos permite el generar representaciones gráficas TPS (Adams, 1999; Adams *et al.*, 2013).

Estas gradillas son particularmente útiles para describir diferencias de forma entre grupos y localizar las zonas de mayor cambio (Adams, 1999; Adams *et al.*, 2013).

Esta visión que nos da la morfometría geométrica está en consonancia con los principios de integración propuestos por Moss, (1971; 1997), pues permite ver cuáles son las unidades funcionales que presentan una mayor covarianza y cuales son aquellas que manifiestan un comportamiento más modular. Es importante resaltar que el grupo C en el presente trabajo es pequeño, lo cual podría dotar de alguna debilidad al estudio, pero esto queda superado por la gran cohesión y homogeneidad que presenta este grupo en las representaciones de PCA (Fig.10.11) y de CVA (Fig. 10.13). Se puede concluir que es un grupo pequeño pero homogéneo y muy representativo.

11.1.6 CAMBIOS EN EL COMPLEJO NASOMAXILAR

Los dos grupos de deformación craneal intencionada empleados en este trabajo, muestran dos tipos de respuesta frente a dos acciones deformadoras distintas. Siguiendo la hipótesis del “*balloon model*” (Enlow y Hans, 1996): la deformación anteroposterior se caracteriza por una restricción en el sentido antero-posterior y por una compensación medio-lateral (Cheverud *et al.*, 1992; Jimenez *et al.*, 2012), la deformación circunferencial presenta una restricción medio-lateral y supero-inferior teniendo una compensación antero-posterior (Kohn *et al.*, 1993) por ello, en la bibliografía, se ha descrito que en la deformación antero-posterior se produce un acortamiento antero-posterior del NMC y en la deformación circunferencial, por el contrario, se produce un alargamiento antero-posterior del NMC (Cheverud *et al.*, 1992; Kohn *et al.*, 1993). Los resultados obtenidos en el presente trabajo matizan y contradicen estas aseveraciones: en el grupo AP, si se produce un prognatismo puntual de los huesos nasales y de la espina nasal anterior, pero el punto A no se altera y nasion y glabella sufren un desplazamiento hacia atrás (Fig.10.16). En el grupo C no hay prognatismo de la de la espina nasal anterior, pero sí en los huesos nasales, y retrusión de glabella (Fig.10.15). La protrusión que se produce en el prostion en AP y C está en relación con la compensación alveolar, muy evidente (especialmente en el grupo C) y ya apuntada en la literatura (Anton, 1989; Jimenez *et al.*, 2012) (Fig.10.14). Esta compensación alveolar, responsable de gran parte de la varianza intergrupos, es probablemente debida, en gran medida a los procesos eruptivos dentarios, a la migración de los gérmenes a través del hueso maxilar (Enlow y Bang, 1965) y a factores oclusales que desempeñan un papel compensador para preservar la función des sistema estomatognatico (Kiliaridis *et al.*, 1995). No hay un desplazamiento neto de la maxila hacia delante, como fue sugerido después del cierre del ángulo de la base craneal (Kasai *et al.*, 1995) o cuando el suelo craneal anterior rota hacia arriba y atrás (Scott, 1967). En realidad, en ambos grupos se produce una compresión antero-posterior del NMC, especialmente en el espacio medio situado anteriormente entre la escotadura piriforme y nasion y el plano maxilar posterior (PM) posteriormente. En este espacio se produce el des-



plazamiento hacia atrás y arriba del reborde orbitario en el grupo C (Anton, 1989; Lieberman *et al.*, 2000) pero en el grupo AP esta alteración de la órbita es muy poco evidente. La compresión de este espacio también afecta a la región zigomático-malar que presenta compresión y ante-rotación en C y solo compresión y restricción vertical posterior en AP.

En ambos tipos de cráneos deformados artificialmente (ADC) se produce una compresión de la zona tuberositaria, zona encargada de la propulsión del NMC hacia delante y abajo (Enlow y Hans, 1996). Esta compresión se produce por el desplazamiento hacia delante del plano PM. En el grupo C este desplazamiento del plano PM no afecta a la espina nasal posterior que se ve involucrada en la post-rotación de la maxila y en su elongación antero-posterior (Anton, 1989). En el grupo AP, a diferencia de lo sostenido por otros autores (Ogura *et al.*, 2006), hay incremento antero-posterior del maxilar que se realiza a expensas de la premaxila. El PM es un plano vertical que funciona como interfaz de encuentro entre la fosa craneal media y el complejo nasomaxilar. Su adscripción como eje que separa dos módulos verticales (Enlow y Hans, 1996; Bastir y Rosas, 2006; Wellens *et al.*, 2013) se ve ratificada por los resultados del presente trabajo, los grandes desplazamientos compensatorios se producen a ambos lados de este eje, pero el plano definido por los *landmarks* del ala esfenoideal y fisura pterigo-maxilar sufre solo un ligero desplazamiento anterior. El plano PM, a través de las apófisis pterigoides, funciona como elemento transmisor de la plasticidad de la base craneal (Björk, 1955). Se ha sugerido que la cifosis de la base craneal, o el avance del clivus se debería asociar a prognatismo maxilar (Kasai *et al.*, 1995), efecto que no se produce de la forma esperada en estos ADC. La protrusión de los huesos nasales podría ser un efecto de propagación de la compresión de la base craneal a través del septo nasal (Scott, 1967) pero más bien parece ser fruto de un efecto de remodelación naso-maxilar local (Enlow y Bang, 1965; Singh *et al.*, 1997).

Es muy posible que gran parte de la tensión del crecimiento del encéfalo se redireccione (Moss, 1958) por la rotación de la lamina cribosa (Anton, 1989), esta rotación hacia arriba y hacia atrás del polo anterior de la fosa craneal anterior tiene como fulcro la sincondrosis esfeno etmoidal (SES) (*landmark wing*) y la vecindad de la silla, y es especialmente llamativo que una estructura considerada tradicionalmente como muy estable (Björk, 1955) sufra una alteración tan evidente en ambas deformaciones. A pesar de su origen endocondral (Sadler, 2006) esta estructura está dotada de una gran plasticidad cumpliendo el principio de la FMH de que el hueso no tiene una posición topográfica pre-definida “*no bone has a predetermined topographic position*” (Moss, 1958). El acortamiento de la fosa craneal anterior conlleva en los ADC la constricción antero-posterior del NMC que ya ha sido evidenciada en otras situaciones (Lieberman, 1998). Esta rotación de la fosa craneal anterior y el desarrollo inferior del maxilar provocan un incremento de la altura facial (Anton, 1989; Cheverud *et al.*, 1992; Kohn *et al.*, 1993; Ogura *et al.*, 2006).

En la base craneal los cambios afectan a las tres fosas. La fosa craneal anterior experimenta

la rotación y desplazamiento arriba comentado que arrastra al techo de la órbita, haciendo sospechar una integración entre estas dos unidades anatómicas. En la fosa craneal media el cierre tardío de la sincondrosis esfeno-occipital (SOS) (Coben, 1998) hace que la presión del encéfalo (Moss, 1958) desplace el clivus hacia delante y abajo, en el grupo C este desplazamiento no provoca cierre del ángulo de la base craneal, es más, la gran rotación del plano cribiforme provoca una platibasia (Anton, 1989). En el grupo AP, no hay tanta compensación en la lámina cribosa y se produce el cierre del ángulo. En la fosa craneal posterior es muy llamativo el desplazamiento de la escama occipital y los cambios en torno al *foramen magnum* que acumulan gran parte de la varianza. El incremento en la fosa craneal posterior de su dimensión sagital y su rotación ventral, junto con el cierre del ángulo clivo-foraminal, pueden probablemente ser explicados por la tensión provocada por el desarrollo encefálico subtentorial (Moss, 1958; Anton, 1989).

11.1.7 INTEGRACIÓN MAXILA

Los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran que hay un grado de integración entre la base craneal y el NMC. Existe una integración entre estructuras vecinas englobadas en la misma unidad funcional, pero también hay cierto grado de integración entre estructuras más distantes que no comparten la misma función. Todo el cráneo es una estructura dotada de gran plasticidad, incluso estructuras de osificación endocondral como la base craneal son capaces de ser modificadas durante su fase de desarrollo por factores ambientales. El desarrollo morfológico de las estructuras craneales es fruto de un conjunto de factores: determinantes genéticos, necesidades funcionales y un sin número de agentes ambientales que dan lugar a su configuración final [Hallgrímsson *et al.*, 2007(b)]. La estricta integración jerárquica entre todas las diferentes unidades funcionales garantiza el funcionamiento y el desarrollo de una estructura tan compleja (Enlow y Hans, 1996; Bastir y Rosas, 2006), incluso cuando se ve sometida a una agresión ambiental tan limitante como la deformación intencionada de la bóveda. Es muy posible que el elemento deformador se mantuviera solo hasta los 4-5 años (La Vega, 2003), pero como hemos visto, la acción sobre sincondrosis que se cierran años después es totalmente significativo, esta alteración estructural de la base craneal hace que el desarrollo del viscerocráneo se lleve a cabo, dentro de un patrón preestablecido, de manera compensadora y con el objetivo de mantener la función. Es muy posible que las modificaciones que se observan en la apófisis alveolar del maxilar sean una respuesta compensadora que se desarrolla para preservar la función del sistema estomatognático (Kiliaridis *et al.*, 1995), que tiene su mayor desarrollo después de que el aparato deformador sea retirado. Hay, en definitiva, una integración generalizada (Martínez-Abadías *et al.*, 2009) que se sobrepone a las diferentes unidades funcionales y que es ratificar que el cráneo en si es bastante más que la suma del desarrollo de una serie de diferentes partes independientes (Moss, 1971; 1997).



11.2 CEFALOMETRÍA CLÁSICA MULTIVARIABLE (CCM)

Como se puede ver comparando los resultados obtenidos en los estudios de GM y CCM, ésta última aporta pocas cosas nuevas al estudio realizado con MG. La MG es capaz, como se ha referido arriba, ya no solo de medir el cambio sino de mostrar las zonas donde el cambio es más evidente. La CCM permite evaluar los cambios morfológicos, permite estudiar cuales son las zonas con mayor alteración, pero presenta, a pesar de emplear métodos de reducción de dimensiones y PCA, una dosis de imprecisión que impide delimitar dónde está el cambio. Los resultados en CCM son más abstractos, no se ciñen a estructuras anatómicas determinadas, no podemos definir módulos ni somos capaces de saber con seguridad cuál de las estructuras que integran el trazado de un ángulo es en realidad la que está experimentando un mayor cambio posicional. Por otro lado la aplicación de PCA a las variables angulares exige algunas restricciones. Es preciso realizar una selección correcta de aquellas variables que se van a analizar, pues, de otro modo, no se va a conseguir que la muestra sea adecuada para el PCA. Es importante recordar que el valor de KMO debe ser superior a 0.6 (Tabachnick y Fidell, 2007), pues, de lo contrario, los resultados del análisis pierden fiabilidad. Este requisito exige que el número de variables originales elegidas ni sea muy amplio, ni sea excesivamente reducido. Además, estas variables han de estar correlacionadas y definir entre ellas una matriz de correlación adecuada para el análisis (prueba de esfericidad de Bartlett) (Tabachnick y Fidell, 2007); pero, por otro lado tiene que haber diferentes lazos de correlación entre las variables originales que permitan definir una estructura subyacente. Es decir, una matriz de estructura que permita vislumbrar las interrelaciones entre las diferentes variables (Fig.15.1, Apéndice I) y su contribución real a la varianza total, es decir, los cambios en la forma (Tabla 10.6; Tabla 10.7). Esas son las grandes ventajas del PCA frente al análisis univariable clásico que no permite realmente saber ni como están relacionadas las variables, ni si el grado de diferencia entre los tres grupos reflejado por el ANOVA es, en realidad, relevante desde el punto de vista jerárquico, ni dónde está concentrada la mayor variación.

La CCM permite vislumbrar una serie de diferencias entre los tres grupos, como se ha visto en los resultados de este análisis; se puede observar que la mayor variación está concentrada en las estructuras de la base craneal, que hay un par de polos de gran variación, la zona occipital que presenta una gran varianza en los grupos deformados y la zona frontal de la base. Hay una serie de alteraciones en las paredes de la fosa craneal posterior que separan a los tres grupos, es especialmente interesante el efecto segregador que tiene la inclinación del plano del techo del peñasco del temporal. Algo similar ocurre con el ángulo de la base craneal que presenta cifosis en AP y platibasia en C. En lo que respecta a las estructuras maxilares no son tan nítidas las



conclusiones, se observa una gran variación en estas estructuras y diferencias en los grupos deformados respecto a los no deformados, se observa un incremento de la dimensión vertical tanto del tercio medio como del tercio inferior facial, pero, a diferencia del GMA, con CCM no se puede definir cuál es la estructura que en realidad está desplazándose ni en qué sentido se desplaza. Sabemos que hay una mayor tendencia al desarrollo dólico pero no sabemos con exactitud dónde está centrado el cambio, no se puede observar con detalle cuáles son los *landmarks* que sufren mayor cambio. Por todo ello las variables SNA y SNB en este análisis, al compartir un componente facial con otro de la base del cráneo, se mantienen como variables complejas que comparten carga en diferentes componentes, y no se puede afirmar con seguridad si su variación se debe a un componente maxilar o a una diferencia en la posición de la base craneal, aspecto a tener en cuenta cuando se aplican estas medidas a casos clínicos (Moyers y Bookstein, 1979).

Se puede con este estudio, al igual que con el GMA, decir que hay un comportamiento integrado del cráneo frente al proceso de deformación, puesto que hay alteración de estructuras maxilares, y puesto que una gran parte de la varianza (PC2) se centra en la zona facial, pero, a diferencia de lo expuesto en GMA, la delimitación es mucho más imprecisa y no permite hacer ninguna inferencia sobre estructuras modulares, ni se puede cuantificar la covarianza.

11.3 LIMITACIONES

Hay varios aspectos en este estudio que condicionan la fiabilidad de los resultados. Es conveniente considerar que las definiciones de los tipos de deformación no son ni nítidos ni universalmente aceptados (Cocilovo *et al.*, 2011), ésto aconseja cautela cuando se procede a comparar los resultados con los de otros autores. Otro problema de este tipo de estudios tiene que ver con la clasificación de los especímenes que presenta siempre cierto grado de incertidumbre debido a la naturaleza subjetiva de la observación.

Una limitación que presenta este estudio proviene del hecho de que se está utilizando material de muestras arqueológicas, por ello, hay que tener en cuenta factores que pueden influir en los resultados como son: muestras pequeñas, dificultad en establecer la edad real de los especímenes, diferentes estados de preservación de los cráneos, etc.

Dentro de este apartado hay también que tener en cuenta la dificultad para conseguir un grupo control realmente no deformado o aparentemente no deformado que provenga de un biotipo próximo a los deformados.

La reducida cantidad de sujetos en algún grupo de la muestra (los deformados circunferenciales), aunque puede amortiguarse con el incremento de sujetos en el grupo control, siempre es un factor a tener en cuenta.

Otro aspecto relevante es la falta de coplanaridad entre algunos de los puntos comparados



y la cautela que se ha de tener al interpretar estos movimientos espaciales entre puntos que no comparten un mismo plano.

Es conveniente reseñar que la morfometría geométrica es un campo de estudio reciente, sometido a una intensa evolución y controversia (Adams, 1999). Pero hay que admitir que nos proporciona herramientas muy útiles tanto para la descripción como para la comprensión de la variación morfológica (Adams, 1999). Las medidas lineales y ángulos de la cefalometría son sin duda informativos, pero, frecuentemente es difícil detectar variaciones morfológicas locales, o asociaciones entre diferentes regiones (Moyers y Bookstein, 1979).









12. CONCLUSIONES





12.1 MANDÍBULA Y BASE

La base craneal de los grupos con deformación craneal intencionada presenta una marcada deformación que provoca una posición más anterior del cóndilo mandibular. Esto lleva a un reajuste de la mandíbula con una modificación adaptativa de la rama mandibular, rotación del cuerpo mandibular y un aumento en la dimensión vertical de la sínfisis. Los efectos específicos que la deformación de la bóveda ejerce en la mandíbula sostiene la teoría de unidades modulares dentro del concepto de la completa integración de la ontogenia craneofacial.

12.2 MAXILA Y BASE

La base craneal de los cráneos con deformación intencional muestra una marcada deformación que produce una constricción antero-posterior del complejo nasomaxilar. Los cambios morfológicos comunes a ambas deformaciones incluyen el aumento del crecimiento del proceso alveolar de la maxila, el desplazamiento anterior del plano pterigomaxilar, alteraciones en el techo de la órbita y un desplazamiento hacia delante y abajo del clivus. Hay también cambios específicos de cada tipo de deformación. En el grupo C se observa una rotación y elongación antero-posterior de la maxila. En el grupo con deformación antero-posterior (AP) hay una retrusión naso-orbital.

La modificación artificial de la forma de la bóveda tiene repercusiones en el complejo nasomaxilar lo que soporta la teoría de una integración totalmente inclusiva de las diferentes unidades craneales e indica que esta es la base del desarrollo y no solo en condiciones normales pero también en situaciones de extrema restricción.

12.3 CEFALOMETRÍA CLÁSICA MULTIVARIABLE

La máxima varianza está recogida en la base craneal. Hay una gran varianza en los maxilares de los grupos deformados. Este método no permite definir con detalle el comportamiento de determinadas estructuras anatómicas ni su participación en la varianza de la muestra.









13. BIBLIOGRAFÍA





Adams, D. C. Methods for shape analysis of *landmark* data from articulated structures. *Evolutionary Ecology Research*. 1999; 1(8): 959-970.

Adams D. C. y Felice R. N. Assessing Trait Covariation and Morphological Integration on Phylogenies Using Evolutionary Covariance Matrices. *PloS one*. 2014; 9(4): e94335.

Adams D. C., Rohlf F. J. y Slice D. E. Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution'. *Italian Journal of Zoology*. 2004; 71(1): 5-16.

Adams D. C., Rohlf F. J. y Slice D. E. A field comes of age: geometric morphometrics in the 21st century. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*. 2013; 24 (1): 1-8.

Admiraal M. Early maritime adaptations and the peopling of the Americas, In: Raemaekers, D.C.M. (Ed.) (2013). *A kaleidoscope of maritime perspectives: Essays on the archaeology, art history and landscape history of the maritime world view*. 2013.

Allison M.J., Gerszten E., Munizaga J., Santoro C. y Focacci G. La práctica de la deformación craneana entre los pueblos andinos precolombinos. *Chungará Arica*. 1981; 8:238-60.

Anderson D. y Popovich F. Relation of cranial base flexure to cranial form and mandibular position. *Am. J. Phys. Anthropol*. 1983; 61(2): 181-187.

Andria L. M., Leite L. P., Prevatte T. M. y King L. B. Correlation of the cranial base angle and its components with other dental/skeletal variables and treatment time. *The Angle Orthodontist*. 2004; 74(3): 361-366.

Andrushko V. A. y Torres E. C. Skeletal evidence for Inca warfare from the Cuzco region of Peru. *Am. J. Phys. Anthropol*. 2011; 146(3): 361-372.

Anton S.C. Intentional cranial vault deformation and induced changes on the cranial base and face. *Am. J. Phys. Anthropol*. 1989; 79 (2):253-267.

Anton S.C, Jaslow C.R y Swartz S.M. Sutural complexity in artificially deformed human (*Homo sapiens*) crania. *J. Morphol* 1992; 214 (3):321-332.

Arkush E. y Tung T. A. Patterns of war in the Andes from the Archaic to the Late Horizon: insights from settlement patterns and cranial trauma. *Journal of Archaeological Research*. 2013; 21(4): 307-369.

Aufderheide A.C. y Rodríguez Martín C. *The Cambridge Encyclopaedia of Human Paleontology*. Cambridge University Press. Cambridge. 2003.

Baab K. L. The impact of superimposition choice in geometric morphometric approaches to morphological integration. *Journal of Human Evolution*. 2013; 65:689-692.

Baab K. L., McNulty, K. P. y Rohlf, F. J. The shape of human evolution: a geometric morphometrics perspective. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*. 2012, Jul-Aug; 21(4):151-165.

Bailey R. C. y Byrnes J. A new, old method for assessing measurement error in both univariate and multivariate morphometric studies. *Systematic Zoology*. 1990; 39(2): 124-130.

Barbeito-Andrés J., Sardi M. L., Anzelmo M. y Pucciarelli H. M. Matrices funcionales e integración morfológica: Un estudio ontogénico de la bóveda y el maxilar. *Revista Argentina de Antropología Biológica*. 2012; 14(1): 79-87.

Barbieri C., Heggarty P., Yang Yao D., Ferri G., De Fanti S., Sarno S., Ciani G., Boattini A., Luiselli D. y Pettener D. Between Andes and Amazon: The genetic profile of the Arawak-speaking Yanésa. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2014;155: 600–609.

Bastir M. A systems-model for the morphological analysis of integration and modularity in human craniofacial evolution. *J. Anthropol Sci.* 2008; 86: 37-58.

Bastir M. y Rosas A. Hierarchical nature of morphological integration and modularity in the human posterior face. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2005; 128(1): 26-34.

Bastir M., y Rosas A. Correlated variation between the lateral basicranium and the cara: a geometric morphometric study in different human groups. *Archives of Oral Biology*. 2006; 51(9): 814-824.

Bastir M., Rosas A. y Kuroe K. Petrosal orientation and mandibular ramus breadth: Evidence for an integrated petroso-mandibular developmental unit. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2004; 123(4): 340-350.

Bastir M., Rosas A., Lieberman D. E. y O'Higgins P. Middle cranial fossa anatomy and the



origin of modern humans. *The Anatomical Record*. 2008; 291(2):130-140.

Bastir M., Rosas A. y O'Higgins P. Craniofacial levels and the morphological maturation of the human skull. *Journal of Anatomy*. 2006; 209(5): 637-654.

Battaglia V., Grugni V., Perego UA., Angerhofer N., Gomez-Palmieri JE., Woodward SR., Achilli A., Myres N., Torroni A. y Semino O. The first peopling of South America: new evidence from Y-chromosome haplogroup Q. *PLoS One*. 2013; 8(8):e71390.

Bauer B. S. y Covey R. A. Processes of state formation in the Inca heartland (Cuzco, Peru). *American Anthropologist*. 2002; 104(3): 846-864.

Benítez H. A. y Püschel T. A. Modelando la varianza de la forma: morfometría geométrica aplicaciones en biología evolutiva. *International Journal of Morphology*. 2014; 32(3): 998-1008.

Bennett K.A. The etiology and genetics of wormian bones. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1965; 23(3):255-260.

Beresford-Jones D. y Heggarty P. Andes: archaeology. Cap 53: 410–416. In: *The Encyclopedia of Global Human Migration*. Ness & P. Bellwood (eds). Oxford: Wiley-Blackwell. 2013.

Berry A.C. y Berry R.J. Epigenetic variation in the human cranium. *J. Anat.* 1967; 101: 361-379.

Björk A. Cranial base development: a follow-up x-ray study of the individual variation in growth occurring between the ages of 12 and 20 years and its relation to brain case and face development. *American Journal of Orthodontics*. 1955; 41(3): 198-225.

Björk A. y Björk L. Artificial deformation and cranio-facial asymetry in ancient peruvians. *J. Dent. Res.* 1964; 43(3):353-362.

Bjork A. y Skieller V. Normal and abnormal growth of the mandible. A synthesis of longitudinal cephalometric implant studies over a period of 25 years. *The European Journal of Orthodontics*. 1983; 5(1):1-46.

Bodner M., Perego U. A., Huber G., Fendt L., Röck A. W., Zimmermann B, Olivieri A., Gó-

mez-Carballa A., Lancioni H., Angerhofer N., Bobillo M.C., Corach D., Woodward S.R., Salas A., Achilli A., Torroni A., Bandelt H. y Parson, W. Rapid coastal spread of First Americans: Novel insights from South America's Southern Cone mitochondrial genomes. *Genome Research*. 2012; 22(5):811-820.

Bolender C, Hanzel B y Turlot J.C. Analyses multidimensionnelles du profil cranio-facial précolombien et péruvien contemporain. *Rev. Orthop. Dento Facial*. 1978, Oct; 12(4):397-421.

Bonatto S. L. y Salzano F. M. (a) Diversity and age of the four major mtDNA haplogroups, and their implications for the peopling of the New World. *The American Journal of Human Genetics*. 1997; 61(6): 1413-1423.

Bonatto S. L., y Salzano F. M. (b) A single and early migration for the peopling of the Americas supported by mitochondrial DNA sequence data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1997; 94(5): 1866-1871.

Bookstein F. L. Foundations of morphometrics. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1982;13:451-470.

Bookstein F.L. *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology* [Orange book]. Cambridge New York: Cambridge University Press. 1991.

Bookstein F. L., Gunz P., Mitteroecker P., Prossinger H., Schaefer K. y Seidler H. Cranial integration in Homo: singular warps analysis of the midsagittal plane in ontogeny and evolution. *Journal of Human Evolution*. 2003; 44(2): 167-187.

Bravi C.M. La evidencia molecular del poblamiento humano de América. *Revista del Museo de la Plata, sección Zoología*. 2013; 20 (177):40-57.

Broca P. Sur le volume et la forme du cerveau suivant les individus et suivant les races. *Bulletins de la Société d'anthropologie de Paris*. 1861; tome II: 139-270.

Broca P. Sur les accidents produite par la pratique des déformations artificielles du crâne. *Bulletins de la Société d'anthropologie de Paris*. 1875; II° Série, tome X: 199-204.

Brothwell D.R. *Digging up Bones: The Excavation, Treatment and Study of Human Skeletal Remains*. British Museum Press, London, 3rd Ed.: 71-72. 1981.



Buikstra J.E. y Ubelaker D.H. *Standards for Data Collection from Human Skeletal Remains*. Arkansas Archaeological Survey Research Series, n°44. Arkansas Archaeological Survey, Fayetteville. 1994.

Burdi A.R. Biological forces which shape the human midface before birth. In: McNamara J. Ed. *Factors affecting the growth of the midface*. Craniofacial Growth Series. n° 6: 9-42. 1976.

Burger R. L. An overview of Peruvian archaeology (1976-1986). *Annual Review of Anthropology*. 1989;18: 37-69.

Burrows A.M, Caruso K.A, Mooney M.P, Smith T.D, Losken H.W y Siegel M.I. Sutural bone frequency in synostotic rabbit crania. *Am. J. Phys Anthropol*. 1997; 102(4):555-563.

Cabieses F. *Dioses y enfermedades. La medicina en el antiguo Perú*. Artegraf. Tomo I. Lima 1974.

Cabieses F. *Dioses y enfermedades. La medicina en el antiguo Perú*. Artegraf. Tomo II. Lima 1974.

Cardini A. y Elton S. Sample size and sampling error in geometric morphometric studies of size and shape. *Zoomorphology*. 2007; 126(2): 121-134.

Carlson D. S. Growth modification: from molecules to mandibles. Reprinted from: *Growth Modification: What Works, What Doesn't, and Why?* McNamara JA (Ed.), Craniofacial Growth Series 35. The University of Michigan. Ann Arbor. 1999.

Carlson D. S. Theories of craniofacial growth in the postgenomic era. In *Seminars in Orthodontics*. 2005, December; 11(4):172-183.

Carlson D. S. y Van Gerven D. P. Masticatory function and post-Pleistocene evolution in Nubia. *Am. J. Phys. Anthropol*. 1977; 46(3): 495-506.

Casas B. de las (1484-1566) *De las antiguas gentes del Perú*. Tipografía de Manuel G. Hernández. Madrid. 1892.

Casas B. de las. *Historia de las Indias Apologetica II*. (1561) Madrid 1909.



Cendekiawan T., Wong R. W. y Rabie A. B. M. Relationships between cranial base synchondroses and craniofacial development: a review. *The Open Anatomy Journal*. 2010; 2(1):67-75.

Chang H., Hsieh S., Tseng Y. y Chou T. Cranial–base morphology in children with Class III malocclusion. *The Kaohsiung Journal of Medical Sciences*. 2005; 21(4): 159-165.

Chapdelaine, C. Recent advances in Moche archaeology. *Journal of Archaeological Research*. 2011; 19(2):191-231.

Chateau M. De la possibilité de modifier les bases osseuses. *L'Orthodontie française*. 1956; 27:257-265.

Cheverud J.M. Phenotypic, genetic, and environmental morphological integration in the cranium. *Evolution*. 1982; 36(3):499-516.

Cheverud J. M. Developmental integration and the evolution of pleiotropy. *American Zoologist*. 1996; 36(1): 44-50.

Cheverud J.M., Kohn L.A.P., Konigsberg L.W. y Leigh S.R. Effects of fronto-occipital artificial cranial vault modification on the cranial base and face. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1992; 88: 323-345.

Cheverud J.M. y Midkiff J.E. Effects of fronto-occipital cranial reshaping on mandibular form. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1992; 87(2):167-171.

Cieza de Leon P. *La Crónica del Perú*. (1551). Espasa Calpe S.A. Madrid. 1932.

Cione A. L., Tonni E. P. y Soibelzon, L. Did humans cause the late Pleistocene-early Holocene mammalian extinctions in South America in a context of shrinking open areas? In: Gary Haynes. *American Megafaunal extinctions at the end of the Pleistocene*. Pág. 125-144. Springer, Netherlands. 2009.

Coben, S. E. The speno-occipital synchondrosis: the missing link between the profession's concept of craniofacial growth and orthodontic treatment. *American Journal of orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 1998; 114(6): 709-712.



Cocilovo J. A. y Varela H. H. La distribución de la deformación artificial del cráneo en el Área Andina Centro Sur. *Relaciones de la Sociedad Argentina de Antropología*. 2010; 35:41-68.

Conrad G. W. Cultural materialism, split inheritance, and the expansion of ancient Peruvian empires. *American Antiquity*. 1981, Jan; 46(1): 3-26.

Cooke S. B. y Terhune C. E. Form, function, and geometric morphometrics. *The Anatomical Record*. 2015; 298(1): 5-28.

Corruccini R.S. *How anthropology informs the orthodontic diagnosis of malocclusion's causes*. The Edwin Mellen Press, Ltd. Lewiston, New York. 1999.

De Saint Pierre M., Gandini F., Perego U.A., Bodner M., Gómez-Carballa A., Corach D., Angerhofer N., Woodward S.R., Semino O., Salas A., Parson W., Moraga M., Achilli A., Torroni A. Y Olivieri A. Arrival of Paleo-Indians to the southern cone of South America: new clues from mitogenomes. *PLoS One*. 2012; 7(12):e51311.

Del Papa M.C. y Pérez S.I. The influence of artificial cranial vault deformation on the expression of cranial nonmetric traits: its importance in the study of evolutionary relationships. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2007; 134(2):251-262.

Delaire J. y Billet J. Considerations sùr les déformations crâniennes intentionnelles. *Rev. Stomatol.* 1964; 65:535-541.

Delisle F. *Contribution à l'étude des déformations artificielles du crâne. Thèse pour le doctorat en médecine*. Paris. 1880.

Dembo A. y Imbelloni J. *Deformaciones intencionales del cuerpo humano de carácter étnico*. José Anesi. 1938.

Dhopatkar A., Bathia S.N. y Rock P. An investigation into the relationship between the cranial base angle and malocclusion. *The Angle Orthodontist*. 2002;72(5):456-463.

Dibbets J. M. H. Morphological associations between the Angle classes. *The European Journal of Orthodontics*. 1996; 18(1): 111-118.

Dillehay T.D. Onde estão os remanescentes ósseos humanos do final do pleistoceno?. *Revista USP*. 1997; 34: 22-23.

Dillehay T. D. The late Pleistocene cultures of South America. *Evolutionary Anthropology*. 1999; 7: 206-216.

Dingwall E. J. *Artificial Cranial Deformation*. John Bale Sons & Danielsson. London. 1931.

Dittmar M. Los Aymaras prehispánicos y actuales: etnogénesis, microdiferenciación y su relación con la población Tiwanaku de América del Sur. *Revista Española de Antropología Americana*. 1996; 26: 231-248.

Doig F. K. *Arqueología Peruana-visión integral*, Promoción Editorial Inca. Editores, publicistas, promotores s.a. Emilio Althaus 470-Lima. 1970.

Dryden I. L. y Mardia K. V. *Statistical shape analysis* (Vol. 4). Chichester: Wiley. 1998.

Dürer A. *Vier Bücher von menschlicher Proportion*. Hieronymus Formschneyder, Nuremberg. 1528.

El-Najjar M.Y y Dawson G.L. The effect of artificial cranial deformation on the incidence of wormian bones in the lamboidal suture. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1977, Jan; 46(1):155-160.

Enlow D. H. *Handbook of facial growth*. (2nd edition) Philadelphia, London, Toronto. W.B. Saunders Company. 1982.

Enlow D. H. y Bang S. Growth and remodeling of the human maxilla. *American Journal of Orthodontics*. 1965; 51(6): 446-464.

Enlow D.H. y Hans M.G. *Essentials of facial growth*. The structural basis for ethnic variations in facial form. W.B. Saunders Co. Philadelphia. 1996.

Enlow D. H., Moyers R. E., Hunter W. S. y McNamara J. A. A procedure for the analysis of intrinsic facial form and growth. An equivalent-balance concept. *American Journal of Orthodontics*. 1969; 56(1): 6-23.

Enlow D. H., Pfister C., Richardson E., y Kuroda T. An analysis of Black and Caucasian craniofacial patterns. *The Angle Orthodontist*. 1982; 52(4): 279-287.



Fagundes N.J., Kanitz R., Eckert R., Valls A.C., Bogo M.R., Salzano F.M., Smith D.G., Silva W.A. Jr, Zago M.A., Ribeiro-dos-Santos A.K., Santos S.E., Petzl-Erler M.L y Bonatto S.L. Mitochondrial population genomics supports a single pre-Clovis origin with a coastal route for the peopling of the Americas. *The American Journal of Human Genetics*. 2008, Mar; 82(3):583-92.

Fehren-Schmitz L., Hummel S. y Herrmann B. Who Were the Nazca? Population Dynamics in Pre-Columbian Southern Peru Revealed by Ancient DNA Analyses. In: *New Technologies for Archaeology*. Markus Reindel, Günther A. Wagner. pág. 159-172. Springer, Berlin Heidelberg. 2009.

Fehren-Schmitz L., Llamas B., Tomasto E. y Haak, W. El ADN antiguo y la historia del poblamiento temprano del oeste de Sudamérica: lo que hemos aprendido y hacia dónde vamos. *Boletín de Arqueología PUCP*. 2011; 15: 17-41.

Fehren-Schmitz L., Reindel M., Cagigao E.T., Hummel S. y Herrmann B. Pre-Columbian population dynamics in coastal southern Peru: A diachronic investigation of mtDNA patterns in the Palpa region by ancient DNA analysis. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2010, Feb; 141(2):208-221.

Ferreira R. Los tipos de vegetación de la costa peruana. In *Anales del Jardín Botánico de Madrid*. 1983; 40 (1):241-256.

Fiedel S.J. The peopling of the New World: present evidence, new theories, and future directions. *Journal of Archaeological Research*. 2000; 8(1): 39-103.

Franchi L., Baccetti T., Stahl, F. y McNamara Jr J. A. *Thin-plate spline* analysis of craniofacial growth in Class I and Class II subjects. *The Angle Orthodontist*. 2007; 77(4): 595-601.

Franchi L., Pavoni C., Cerroni S. y Cozza P. *Thin-plate spline* analysis of mandibular morphological changes induced by early class III treatment: a long-term evaluation. *The European Journal of Orthodontics*. 2014, Aug; 36(4): 425-30.

Frankel R. y Frankel C. *Orofacial Orthopedics with the function regulator*. Karger. München. 1989.

Fuselli S., Tarazona-Santos E., Dupanloup I., Soto A., Luiselli D. y Pettener D. Mitochondrial DNA diversity in South America and the genetic history of Andean

highlanders. *Molecular biology and evolution*. 2003 Oct; 20(10):1682-1691.

Gadison D. N. *Extrinsic Effects of Cranial Modification: A Case Study of Cranial Porosity and Cranial Modification Intensity in Late Intermediate Period (AD 1000-AD 1400) Andahuaylas, Peru*. Thesis, Georgia State University, 2015.

García-Hernández F., y Murphy-Echeverría G. Índice craneano en grupos étnicos precolombinos del Norte de Chile con deformación craneal artificial. *International Journal of Morphology*. 2009; 27(2): 587-594.

Gibbon W. M. Artificially deformed skulls with special reference to the temporal bone and its tympanic portion. *The Laryngoscope*. 1912; 22: 1165–1181.

Gillick H. *Ancestry determination using geometric morphometrics*. MRes in Forensic Anthropology. University of Dundee. August, 2012.

Gkantidis N. y Halazonetis D. J. Morphological integration between the cranial base and the face in children and adults. *Journal of Anatomy*. 2011; 218(4): 426-438.

Goebel T., Waters M. R. y O'Rourke D. H. The late Pleistocene dispersal of modern humans in the Americas. *Science*. 2008; 319(5869):1497-1502.

González-José R., Bortolini M.C., Santos F.R. y Bonatto S.L. The peopling of America: craniofacial shape variation on a continental scale and its interpretation from an interdisciplinary view. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2008, Oct ; 137(2):175-187.

Gonzalez P. N., Perez S. I. y Bernal V. Ontogenetic allometry and cranial shape diversification among human populations from South America. *The Anatomical Record*. 2011; 294(11): 1864-1874.

Goswami A. (a) Cranial modularity shifts during mammalian evolution. *The American Naturalist*. 2006; 168(2): 270-280.

Goswami A. (b) Morphological integration in the carnivoran skull. *Evolution*. 2006; 60(1): 169-183.

Goswami A. Phylogeny, diet, and cranial integration in Australodelphian marsupials. *PLoS*



one. 2007; 2(10): e995.

Goswami A. y Polly. P. D. (a) Methods for studying morphological integration and modularity. In: J. Alroy and G. Hunt (eds.). *Quantitative Methods in Paleobiology*. pág. 213-243 Paleontological Society Short Course. The Paleontological Society Papers, Volume 16. October 30th, 2010.

Goswami A. y Polly P.D. (b) The influence of modularity on cranial morphological diversity in Carnivora and Primates (Mammalia; Placentals). *PLoS One*. 2010; 5(3): e9517-e9517.

Gottlieb K. Artificial cranial deformation and the increased complexity of the lamboid suture. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1978; 48(2):213-214.

Gunz P. y Mitteroecker P. *Semilandmarks*: a method for quantifying curves and surfaces. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*. 2013; 24(1): 103-109.

Hallgrímsson B., Lieberman D. E., Liu W., Ford-Hutchinson A. F. y Jirik F. R. (a). Epigenetic interactions and the structure of phenotypic variation in the cranium. *Evolution & Development*. 2007; 9(1): 76-91.

Hallgrímsson B., Lieberman D. E., Young N. M., Parsons T. y Wat S. (b). Evolution of covariance in the mammalian skull. In: *Tinkering: the microevolution of development*. Wiley. Chichester. Novartis Foundation Symposium. 2007, June; 284: 164-190.

Hayashi I. Morphological relationship between the cranial base and dentofacial complex obtained by reconstructive computer tomographic images. *European Journal of Orthodontics*. 2003 Aug; 25(4):385-391.

Hennessy R. J. y Stringer C. B. Geometric morphometric study of the regional variation of modern human craniofacial form. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2002; 117(1):37-48.

Hildwein M., Bacon W., Turlot J.C. y Kuntz M. Spécificités et discriminants majeurs dans une population de Classe II division 1. *Revue d'Orthopédie Dento-Faciale*. 1986; 20(2) : 197-208.

Hipocrat. *Des airs, des eaux et des lieux. Oeuvres complètes*. Union Littéraire et Artistique. tomo I. París. 1955.



Hopkin G. B., Houston W. J. B. y James G. A. The Cranial Base as an Aetiological Factor in Malocclusion. *The Angle Orthodontist*. 1968; 38(3): 250-255.

Hoyte D.A. The cranial base in normal and abnormal skull growth. *Neurosurgery Clinics of North America*. 1991, Jul; 2(3):515-537.

Hrdlicka A. Artificial deformations of the human skull with special reference to America. In: *Actas del XVII Congreso Internacional de Americanistas*. Lehmann-Nistche R. International Society of Americanists. Buenos Aires. 1912.

Hrdlička A. Aymara deformation in America. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1922; 5: 400.

Isbell W. H. Wari and Tiwanaku: international identities in the central Andean Middle Horizon. In: *The Handbook of South American Archaeology*. pág 731-759. Springer. New York. 2008.

Jeffery N., y Spoor F. Brain size and the human cranial base: a prenatal perspective. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2002; 118(4): 324-340.

Jiang X., Iseki S., Maxson R. E., Sucov H. M., y Morriss-Kay G. M. Tissue origins and interactions in the mammalian skull vault. *Developmental Biology*. 2002; 241(1): 106-116.

Jiménez Díaz, M. J. Pacatnamú: una aproximación a un sitio arqueológico de la Costa Norte del Perú. *EHSEA*. 1997, Enero-Junio; 14: 7-23.

Jimenez P., Martinez-Insua A., Franco-Vazquez J., Otero-Cepeda X.L. y Santana U. Maxillary changes and occlusal traits in crania with artificial fronto-occipital deformation. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2012; 147(1):40-51.

Johnston L.E. The Functional Matrix Hypothesis: reflections in a jaundiced eye. In: McNamara J. Ed. *Factors affecting the growth of the midface*. Craniofacial Growth Series.nº 6: 131-168. 1976.

Kabbani H., y Raghuveer T. S. Craniosynostosis. *American Family Physician*. 2004, Jun; 69(12): 2863-2870.



Kasai K., Moro T., Kanazawa E. y Iwasawa T. Relationship between cranial base and maxillofacial morphology. *European Journal of Orthodontics*. 1995, Oct; 17(5):403-410.

Kendall D.G. The diffusion of shape. *Advances in Applied Probability*. 1977; 9:428-430.

Kerr W. J. S. y Adams C.P. Cranial base and jaw relationship. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1988; 77(2): 213-220.

Kiliaridis S., Johansson A., Haraldson T., Omar R. y Carlsson G. E. Craniofacial morphology, occlusal traits, and bite force in persons with advanced occlusal tooth wear. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 1995; 107(3): 286-292.

Klingenberg C. P. Morphological integration and developmental modularity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematic*. 2008; 39:115–132.

Klingenberg C. P. Morphometric integration and modularity in configurations of landmarks: tools for evaluating a priori hypotheses. *Evolution & Development*. 2009; 11(4): 405-421.

Klingenberg C. P. MorphoJ: an integrated software package for geometric morphometrics. *Molecular Ecology Resources*. 2011; 11(2): 353-357.

Klingenberg C. P. Course introduction to geometric morphometrics held at the premises of Sabadel of the instituto Català de Paleontologia Miquel Crusafont. Barcelona. España. 12-15 Junio, 2012.

Klingenberg C. P. Cranial integration and modularity: insights into evolution and development from morphometric data. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*. 2013; 24(1): 43-58.

Klingenberg, C. P. Analyzing Fluctuating Asymmetry with Geometric Morphometrics: Concepts, Methods, and Applications. *Symmetry*. 2015; 7(2): 843-934.

Klingenberg C. P. y Monteiro L. R. Distances and directions in multidimensional shape spaces: implications for morphometric applications. *Systematic Biology*. 2005; 54(4): 678-688.

Klocke A., Nanda R. S. y Kahl-Nieke B. Role of cranial base flexure in developing sagittal jaw discrepancies. *American journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2002; 122(4): 386-391.

Kohn L.A.P, Leigh S.R. y Cheverud J.M. Asymetric vault modification in Hopi crania.

Am. J. Phys. Anthropol. 1995; 98(2):173-195.

Kohn L. A.P. Leigh S.R., Jacobs S.C. y Cheverud J.M. Effects of annual cranial vault modification on the cranial base and face. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1993; 90(2):147-168.

Kuentz A., Ledru, M. P., y Thouret J. C. Environmental changes in the highlands of the western Andean Cordillera, southern Peru, during the Holocene. *The Holocene.* 2011; 22(11):1215-1226.

Kuroe K., Rosas A. y Molleson T. Variation in the cranial base orientation and facial skeleton in dry skulls sampled from three major populations. *European Journal of Orthodontics.* 2004; 26(2): 201-207.

La Vega G de. *Comentarios Reales.* Madrid (1609). Espasa Calpe. 2003.

Lastres J.B. *Historia de la medicina peruana. I La medicina incaica.* En: Eguiguren LA. Editor. *Historia de la Universidad.* Vol V. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima. 1951.

Lastres J.B. y Cabieses F. (a). La trepanación del cráneo en el antiguo Perú. *Anales de la Facultad de Medicina.* 1959; 42 (3): 258-320.

Lastres J.B., Cabieses F. (b). La trepanación del cráneo en el antiguo Perú (continuación). *Anales de la Facultad de Medicina.* 1959; 42 (4):457-522.

Lauremberg P. *Pasicompse nova.* Lipsiae. 1634.

Lawing A. M. y Polly P. D. Geometric morphometrics: recent applications to the study of evolution and development. *Journal of Zoology.* 2010; 280 (1): 1-7.

Lewis M. E. Endocranial lesions in non-adult skeletons: understanding their aetiology. *International Journal of Osteoarchaeology.* 2004; 14(2): 82-97.

Lieberman D. E. Sphenoid shortening and the evolution of modern human cranial shape. *Nature.* 1998; 393:158-162.

Lieberman D.E. Speculations about the selective basis for modern human craniofacial form. *Evolutionary Anthropology.* 2008; 17:55-68.



Lieberman D. E. Epigenetic Integration, Complexity and Evolvability of the Head In: *Epigenetics: linking genotype and phenotype in development and evolution*. Hallgrímsson, B., & Hall, B. K. (Eds.). Univ. of California Press. 2011.

Lieberman D. E., Hallgrímsson B., Liu W., Parsons T. E. y Jamniczky H. A. Spatial packing, cranial base angulation, and craniofacial shape variation in the mammalian skull: testing a new model using mice. *Journal of Anatomy*. 2008; 212(6): 720-735.

Lieberman D. E., McBratney B. M. y Krovitz, G. The evolution and development of cranial form in Homo sapiens. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2002; 99(3): 1134-1139.

Lieberman D. E. y McCarthy R. C. The ontogeny of cranial base angulation in humans and chimpanzees and its implications for reconstructing pharyngeal dimensions. *Journal of Human Evolution*. 1999; 36(5): 487-517.

Lieberman D. E., Pearson O. M. y Mowbray K. M. Basicranial influence on overall cranial shape. *Journal of Human Evolution*. 2000; 38(2): 291-315.

Lieberman D. E., Ross C. F. y Ravosa M. J. (b). The primate cranial base: ontogeny, function, and integration. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2000; 113(s 31): 117-169.

Lima T.A. O povoamento inicial do continente americano: migrações, contextos, datações. In: Silva H.P. y Carvalho C. R. *Nossa Origem*, Rio de Janeiro: Ed. Vieira & Lent. 2006.

Loy A., y Slice D. E. Image data banks and geometric morphometrics. In: *Tools for Identifying Biodiversity: Progress and Problems*. Nimis P. L., Vignes Lebbe R. (eds.) 2010.

Lucker G.W. Esthetics and quantitative analysis of facial appearance. In: Lucker GW, Ribbens KA, McNamara JA. (editors). *Psychological aspects of facial form*. Center for Human Growth and Development. The University of Michigan. Ann Arbor. Michigan 1980.

Lumbreras L.G., Kaulicke P., Santillana J. I. y Soriano W. E. *Compendio de historia económica del Perú* (Vol. 1): Economía prehispánica /Carlos Contreras, ed. Lima: Banco Central de Reserva del Perú.; IEP. (Serie: Historia Económica, 1). 2008.

Mallory J.P. In: *The search of the Indo-Europeans. Language, Archaeology and Myth*.

Thames & Hudson. London. 1989.

Mangano A. y Mangano A. Cranial base angulation as determinat of malocclusion: a review. *The Orthodontic CYBER Journal*, July. 2010.

Manríquez G., González-Bergás F. E., Salinas J. C. y Espoueyes, O. Deformación intencional del cráneo en poblaciones arqueológicas de Arica, Chile: análisis preliminar de morfometría geométrica con uso de radiografías craneofaciales. *Chungará (Arica)*. 2006; 38(1): 13-34.

Marino Jr. R. y Gonzales-Portillo M. Preconquest Peruvian neurosurgeons: A study of Inca and pre-Columbian trephination and the art of medicine in ancient Peru. *Neurosurgery*. 2000; 47(4): 940-950.

Martínez-Abadías N., Esparza M., Sjøvold T., González-José R., Santos M. y Hernández M. Heritability of human cranial dimensions: comparing the evolvability of different cranial regions. *Journal of Anatomy*. 2009; 214(1): 19-35.

Martínez-Abadías N., Esparza M., Sjøvold T., González-José R., Santos M., Hernández, M. y Klingenberg C. P. Pervasive genetic integration directs the evolution of human skull shape. *Evolution*. 2012; 66(4): 1010-1023.

Martínez-Abadías N., Mitteroecker P., Parsons T. E., Esparza M., Sjøvold T., Rolian, C., Richtsmeier J.T. y Hallgrímsson B. (b). The developmental basis of quantitative craniofacial variation in humans and mice. *Evolutionary Biology*. 2012; 39(4): 554-567.

Martínez-Abadías N., Paschetta C., de Azevedo S., Esparza M. y González-José R. (b). Developmental and genetic constraints on neurocranial globularity: insights from analyses of deformed skulls and quantitative genetics. *Evolutionary Biology*. 2009; 36(1): 37-56.

Martínez-Maza C. *Ontogenia y filogenia del modelado óseo en el esqueleto facial y la mandíbula de los hominoideos: estudio de la línea filogenética neandertal a partir de las muestras de Atapuerca-SH y el Sidrón* (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid). 2008.

McCarthy R. C. y Lieberman D. E. Posterior maxillary (PM) plane and anterior cranial architecture in primates. *The Anatomical Record*. 2001; 264(3):247-260.



McIntyre G. T., y Mossey, P. A. Size and shape measurement in contemporary cephalometrics. *European Journal of Orthodontics*. 2003; 25(3): 231-242.

McNeill R.W. y Newton G.N. Cranial base morphology in association with intentional cranial vault deformation. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1965; 23(3):241-253.

Menzel D. *The archeology of ancient Peru and the work of Max Uhle*. Berkeley: RH Lowie Mus. Anthropol. Univ. CA.Berkeley. 1977.

Merriwether D. A., Hall W. W., Vahlne A. y Ferrell R. E. mtDNA variation indicates Mongolia may have been the source for the founding population for the New World. *American Journal of Human Genetics*. 1996; 59(1): 204.

Merriwether D.A., Rothhammer F. y Ferrell R.E. Distribution of the four founding lineage haplotypes in Native Americans suggests a single wave of migration for the New World. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1995, Dec; 98(4):411-430.

Misarti N., Finney B. P., Jordan J. W., Maschner H. D., Addison J. A., Shapley M. D., Krumhardt A., y Beget J. E. Early retreat of the Alaska Peninsula Glacier Complex and the implications for coastal migrations of First Americans. *Quaternary Science Reviews*. 2012; 48: 1-6.

Mitteroecker P. y Bookstein F. The evolutionary role of modularity and integration in the hominoid cranium. *Evolution*. 2008; 62(4): 943-958.

Mitteroecker P. y Gunz P. Advances in geometric morphometrics. *Evolutionary Biology*. 2009; 36(2): 235-247.

Mitteroecke P. y Huttegger S. M. The concept of morphospaces in evolutionary and developmental biology: Mathematics and metaphors. *Biological Theory*. 2009; 4(1):54-67.

Moloy H.F. Studies of head molding during labor. *Am J. Obst. Gynecol.* 1942; 44:762-782.

Monteiro L.R., Bonato V. y dos Reis S.F. Evolutionary integration and morphological diversification in complex morphological structures: Mandible shape divergence in spiny rats (Rodentia, Echimyidae). *Evolution & Development*. 2005; 7(5):429-439.

Morriss-Kay G. M. y Wilkie A. O. Growth of the normal skull vault and its alteration in craniosynostosis: insights from human genetics and experimental studies. *Journal of Anatomy*.



2005; 207(5): 637-653.

Moss M.L. The pathogenesis of artificial cranial deformation. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1958, Set; 16(3): 269-286.

Moss M.L. The functional matrix. In: Kraus B, Reidel R. editors. *Vistas in orthodontics*. Philadelphia: Lea and Febiger. 1962.

Moss ML. Functional cranial analysis and the functional matrix. In: *Patterns of orofacial growth and development*. Ann Arbor, Michigan: Am. Speech and Hearing Association Reports. 6:5-18.1971.

Moss M. L. Twenty years of functional cranial analysis. *American Journal of Orthodontics*. 1972; 61(5): 479-485.

Moss M. L. (a). The functional matrix hypothesis revisited. 1. The role of mechanotransduction. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 1997; 112(1): 8-11.

Moss M. L. (b). The functional matrix hypothesis revisited. 2. The role of an osseous connected cellular network. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 1997; 112(2): 221-226.

Moss M. L. (c) The functional matrix hypothesis revisited. 3. The genomic thesis. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 1997; 112(3):338-342.

Moss M. L. (d).The functional matrix hypothesis revisited. 4. The epigenetic antithesis and the resolving synthesis. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 1997; 112(4):410-417.

Moss M. L. The differential roles of periosteal and capsular functional matrices in orofacial growth. *The European Journal of Orthodontics*. 2007; 29(suppl 1):i96-i101.

Moss M. L. y Salentijn L. The primary role of functional matrices in facial growth. *American Journal of Orthodontics*. 1969; 55(6):566-577.

Moss M. L. y Young R. W. A functional approach to craniology. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1960; 18(4): 281-292.



- Moyers R. E. y Bookstein F. L. The inappropriateness of conventional cephalometrics. *American Journal of Orthodontics*. 1979; 75(6): 599-617.
- Munizaga, J. R. Deformación craneana intencional en América. *Revista Chilena de Antropología*. 1987; 6: 113-147.
- Neves W. A., Prous A., González-José R., Kipnis, R. y Powell J. Early Holocene human skeletal remains from Santana do Riacho, Brazil: implications for the settlement of the New World. *Journal of Human Evolution*. 2003; 45(1): 19-42.
- Neves W. A. y Pucciarelli H. M. Morphological affinities of the first Americans: an exploratory analysis based on early South American human remains. *Journal of Human Evolution*. 1991; 21(4): 261-273.
- Oettking B. Declination of the Pars Basilaris in Normal and in Artificially Deformed Skulls: A Study Based on Skulls of the Chumash of San Miguel Island, California, and on Those of the Chinock. In : *Indian Notes and Monographs n°27*: 3-25. Edited by F. W. Hodge. Museum of the American Indian Heye Foundation. 1924.
- Oettking B. Craniology of the North Pacific Coast. In: *The Jesup North Pacific Coast Expedition*. Boas F (editor). Vol XI. EJ Brill Ltd, Leiden & GE Stechert New York. 1930. University of Idaho Library. Reimpreso en 1975.
- Ogura M., Al-Kalaly A., Sakashita R., Kamegai T. y Miyawaki S. Relationship between anteroposterior cranial vault deformation and mandibular morphology in a pre-Columbian population. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2006, Oct; 130(4): 535-539.
- O'Loughlin V. D. Effects of Different Kinds of Cranial Deformation on the Incidence of Wormian Bones. *Am. J. Phys. Anthropol*. 2004; 123(2):146-155.
- Olson E.C. y Miller R.L. *Morphological Integration*. University of Chicago Press. Chicago. 1958.
- Opperman L. A. Cranial sutures as intramembranous bone growth sites. *Developmental Dynamics*. 2000; 219(4):472-485.



Özbek M. Cranial deformation in a subadult sample from Değirmentepe (Chalcolithic, Turkey). *Am. J. Phys. Anthropol.* 2001; 115(3): 238-244.

Pardal R. La deformación intencional de la cabeza en América. Su estudio desde el punto de vista médico. El cráneo y el cerebro en el tipo tabular erecto de la clasificación de Imbelloni. *Rev Med Latinoamericana. Año XX.* 236:817-847.

Paschetta C., de Azevedo S., Castillo L., Martínez-Abadías N., Hernández M., Lieberman D. E. y González-Jose R. The influence of masticatory loading on craniofacial morphology: a test case across technological transitions in the Ohio Valley. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2010; 141(2): 297-314.

Pezzia A. A. Un cráneo deformado de Chongos. *Antropología Física Peruana.* Imprenta Ojeada. Ica. 1963.

Polat Ö. Ö.y Kaya B. Changes in cranial base morphology in different malocclusions. *Orthodontics & Craniofacial Research.* 2007; 10(4): 216-221.

Pomeroy E., Stock J. T., Zakrzewski S. R. y Lahr M. M. A metric study of three types of artificial cranial modification from north-central Peru. *International Journal of Osteoarchaeology.* 2010; 20(3): 317-334.

Portugal, A. R. Mitos e fatos nas crônicas da conquista do Antigo Peru. *História Unisinos.* 2010; 14(2):112-120.

Portugal A. R., y de Morais M. V. Hernán Cortés e Francisco Pizarro: História e Memórias. Dossiê: *nações e nacionalismos na américa espanhola: História, sociedade e cultura. Temas y matizes.* 2010; 9 (18):85-110.

Proff P., Will F., Bokan I., Fanghanel J. y Gedrange T. Cranial base features in skeletal Class III patients. *The Angle Orthodontist.* 2008; 78 (3): 433-439.

Pucciarelli H.M. The influence of experimental deformation on neurocranial wormian bones in rats. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1974; 41(1):29-37.

Pucciarelli H. Explicando el Paleoamericano y su probable extinción, a través de inferencias comparativas y experimentales. *Runa.* 2009; 30 (1): 9-27.



Pucciarelli H. M., Neves W. A., González-José R., Sardi M. L., Rozzi F. R., Struck A., y Bonilla M. Y. East–West cranial differentiation in pre-Columbian human populations of South America. *HOMO-Journal of Comparative Human Biology*. 2006; 57(2):133-150.

Quilter J. y Koons M. L. The fall of the Moche: a critique of claims for South America's first state. *Latin American Antiquity*. 2012; 23(2): 127-143.

Reindel M. y Isla J. A. Evidencias de culturas tempranas en los valles de Palpa, costa sur del Perú. *Boletín de Arqueología PUCP*. 2006; 10: 237-283.

Reindel M. y Schaich M. *3D-Documentation and Modelling of Paracas. Settlements in the Highlands of Southern Peru*. German Archaeological Institute (DAI), Commission for Archaeology of Non-European Cultures (KAAK), Bonn; ArcTron 3D GmbH, Altenthann. 2013.

Reiss W. y Stübel A. (1880-1887). *The Necropolis of Ancon in Peru. A contribution to our knowledge of the culture and industries of the Empire of the Incas*. Third volume. A. Asher & Co. Berlin.

Restall M. Los siete mitos de la conquista española. Paidós. Barcelona. 2004.

Richtsmeier J. T. y DeLeon V. B. Morphological integration of the skull in craniofacial anomalies. *Orthodontics & craniofacial research*. 2009; 12(3): 149-158.

Richtsmeier J.T., DeLeon V.B. y Lele S.R. The promise of geometric morphometrics. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2002; 119(Suppl 35):63-91.

Rohlf F. J. y Marcus L. F. A revolution in morphometrics. *Trends in Ecology & Evolution*. 1993; 8 (4): 129-132.

Rojas-Sepúlveda C. M., y Dutour O. Première évaluation Paléoépidémiologique d'une série ostéoarchéologique de la côte centrale Péruvienne: le site d'Ancón 1. *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*. 2009; 21(3-4): 113-139.

Rosas A., Bastir M., Alarcón J. A. y Kuroe K. *Thin-plate spline* analysis of the cranial base in African, Asian and European populations and its relationship with different malocclusions. *Archives of Oral Biology*. 2008; 53(9): 826-834.

Rothhammer F. y Dillehay T.D. The late Pleistocene colonization of South America: an interdisciplinary perspective. *Annals of Human Genetics*. 2009, Sep; 73 (5): 540-549.

Ruff C., Holt B., Trinkhaus E. Who is afraid if the big bad Wolff? : Wolff's Law and bone functional adaptation. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2006; 129(4):484-498.

Sadler T.W. *Langman's medical embryology*. 10th edit. Baltimore. Lippincott Williams & Wilkins. 2006.

Santa Cruz-Pachacutic J de. *Historia de los Incas. Relación de su gobierno* (1613). Librería San Martí. Lima. 1927.

Santos F.R. , Pandya A., Tyler-Smith C., Pena S.D., Schanfield M., Leonard W.R., Osipova L., Crawford M.H. y Mitchell R.J. The central Siberian origin for native American Y chromosomes. *The American Journal of Human Genetics*. 1999, Feb; 64(2):619-628.

Sardi M. L., Barbeito G., Anzelmo M., Rossi F. V. R. y Pucciarelli H. M. El cierre de la sincondrosis esfeno-basilar y su influencia en la morfología craneofacial. *Revista Argentina de Antropología Biológica*. 2008; 10(2): 7-19.

Sardi M. L. y Rozzi F. R. Developmental connections between cranial components and the emergence of the first permanent molar in humans. *Journal of Anatomy*. 2007; 210(4): 406-417.

Sardi M. L., Ventrice F. y Ramírez Rozzi F. Allometries throughout the late prenatal and early postnatal human craniofacial ontogeny. *The Anatomical Record*. 2007; 290(9): 1112-1120.

Sarnat B.G. The postnatal maxillary-Nasal_orbital complex: some considerations in experimental surgery. In: McNamara J. Ed. *Factors affecting the growth of the midface*. Craniofacial Growth Series n° 6: 101-129.1976.

Sarnat B. G. Normal and abnormal craniofacial growth: Some experimental and clinical considerations. *The Angle Orthodontist*. 1983; 53(4): 263-289.

Schaefer K. y Bookstein F. L. Does geometric morphometrics serve the needs of plasticity research? *Journal of Biosciences*. 2009; 34(4): 589-599.

Schendel, S. A., Walker, G., y Kamisugi, A. Hawaiian craniofacial morphometrics: Average



Mokapuan skull, artificial cranial deformation, and the “rocker” mandible. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1980; 52(4): 491-500.

Schurr T. G. The peopling of the New World: perspectives from molecular anthropology. *Annual Review of Anthropology.* 2004; 33: 551-583.

Scliar M. O., Gouveia M. H., Benazzo A., Ghirotto S., Fagundes, N. J., Leal T. P., ... y Tarazona-Santos E. Bayesian inferences suggest that Amazon Yunga Natives diverged from Andeans less than 5000 ybp: implications for South American prehistory. *BMC Evolutionary Biology.* 2014; 14(1): 174.

Scott J. H. The growth of the human face. *Proceedings of the Royal Society of Medicine.* 1953; 47(2): 91 -100.

Scott J.H. *Dentofacial development and growth.* Pergamon Press. Oxford. 1967.

Shimada I., Shinoda K., Farnum J., Corruccini R. y Watanabe H. An Integrated Analysis of Pre-Hispanic Mortuary Practices: A Middle Sicán Case Study 1. *Current Anthropology.* 2004; 45(3): 369-402.

Shinoda K. I., Adachi N., Guillen S. y Shimada I. Mitochondrial DNA analysis of ancient Peruvian highlanders. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2006; 131(1): 98-107.

Silverman H., e Isbell W. *Handbook of South American Archaeology.* Springer Science & Business Media. 2008.

Singh G. D., McNamara J. A.y Lozanoff S. *Thin-plate spline* analysis of the cranial base in subjects with Class III malocclusion. *The European Journal of Orthodontics.* 1997; 19(4): 341-353.

Singh G. D., McNamara Jr J. A., y Lozanoff S. (b). Localisation of deformations of the mid-facial complex in subjects with class III malocclusions employing *thin-plate spline* analysis. *Journal of Anatomy.* 1997; 191(04): 595-602.

Singh N., Harvati K., Hublin J. J. y Klingenberg C. P. Morphological evolution through integration: a quantitative study of cranial integration in Homo, Pan, Gorilla and Pongo. *Journal of Human Evolution.* 2012; 62(1): 155-164.

Slice D. E. *Morpheus et al.: software for morphometric research*. Department of Ecology and Evolution, State University of New York, Stony Brook, New York. 1998.

Slice D. E. Geometric morphometrics. *Annu. Rev. Anthropol.* 2007; 36: 261-281.

Slovak N. M., Paytan A., y Wiegand B. A. Reconstructing Middle Horizon mobility patterns on the coast of Peru through strontium isotope analysis. *Journal of Archaeological Science*. 2009; 36(1): 157-165

Solow B. The dentoalveolar compensatory mechanism: background and clinical implications. *British Journal of Orthodontics*. 1980; 7(3): 145-161.

Sperber G. H., Guttman G. D. y Sperber S. M. *Craniofacial development (Book for Windows & Macintosh)* (Vol. 1). BC Decker Inc. Hamilton. 2001.

Stanish C. The origin of state societies in South America. *Annual Review of Anthropology*. 2001; 30: 41-64.

Tabachnick B.G. y Fidell L.S. *Using multivariate statistics (5th ed)* Upper Saddle River. New Jersey. Pearson Allyn & Bacon. 2007.

Tanabe Y., Taguchi Y. y Noda T. Relationship between cranial base structure and maxillofacial components in children aged 3-5 years. *European Journal of Orthodontics*. 2002; 24(2): 175-181.

Tarazona-Santos E., Carvalho-Silva D.R., Pettener D., Luiselli D., De Stefano G.F., Labarga C.M., Rickards O., Tyler-Smith C., Pena S.D. y Santos F.R. Genetic differentiation in South Amerindians is related to environmental and cultural diversity: evidence from the Y chromosome. *The American Journal of Human Genetics*. 2001, Jun; 68(6):1485-1496.

Tello J.C. Un molde de Escenografía Plástica en el arte peruano antiguo. *Wiracocha* 1931; vol 1 nº1.

Tello J.C. *Paracas I*. The Institute of Andean Research. T. Scheuch. Lima. 1959.

Tello J. C. y Xesspe, T. M. *Paracas II parte, cavernas y necrópolis*. Universidad Nacional



Mayor de San Marcos. Lima-Perú. 1979.

Thiesen G., Pletsch G., Zastrow M. D., do Valle C. V. M., do Valle-Corotti K. M., Patel M. P. y Conti P. C. R. Comparative analysis of the anterior and posterior length and deflection angle of the cranial base, in individuals with facial Pattern I, II and III. *Dental Press Journal of Orthodontics*. 2013, Jan-Fev; 18(1): 69-75.

Thomas J. Les déformations crâniennes intentionnelles dans les Andes d'après les sources espagnoles (XV I e-XV II e siècle). *Universite Abderrahmane Mira-Bejaia. Revue Références*. 2013, Décembre; 1:54-88.

Thompson D. A. W. *On growth and form*. Cambridge University Press, Cambridge. 1917.

Thurstone L.L. *Multiple factor analysis: A development and expansion of vectors of the mind*. Chicago. University of Chicago Press. 1947.

Tinteroff G. V. *De Paracas à Nazca sur la côte sud du Pérou : archéologie d'une mutation culturelle*. Thèse de Doctorat Théorie et Pratique de l'Archéologie. Université Paris. Sorbonne (Paris IV). 2008.

Tomasto Cagigao, E. L. *Caries dental y dieta en poblaciones prehispánicas de los valles de Palpa, costa sur del Perú (3500 aC-1000 dC)*. Tesis para optar el grado de Magíster en Antropología Forense y Bioarqueología. Pontificia Universidad Católica Del Perú. Escuela de Postgrado. Lima. Octubre. 2009.

Toro I. M. V., Manriquez S. G. y Suazo G. I. Morfometría geométrica y el estudio de las formas biológicas: De la morfología descriptiva a la morfología cuantitativa. *International Journal of Morphology*. 2010; 28(4): 977-990.

Torres-Rouff C. y Yablonsky L.T. Cranial vault modification as a cultural artifact: a comparison of the Eurasian steppes and the Andes. *Homo -Journal of Comparative Human Biology*. 2005; 56(1):1-16.

Valdez L. M., Williams J. S., y Bettcher K. J. Prácticas mortuorias Wari en Marayniyoq, Valle de Ayacucho, Perú. *Chungará (Arica)*. 2006; 38(1):113-127.

Valeri C.J., Cole III T.M, Lele S. y Richtsmeier J.T. Capturing data from three dimensional surfaces using fuzzy landmarks. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1998; 107(1):113-124.

Van Gijseghem H. A frontier perspective on Paracas society and Nazca ethnogenesis. *Latin American Antiquity*. 2006; 17(4): 419-444.

Van Gijseghem, H. y Vaughn K. J. Regional integration and the built environment in middle-range societies: Paracas and early Nazca houses and communities. *Journal of Anthropological Archaeology*. 2008; 27(1): 111-130.

Varrela J. Longitudinal assessment of Class II occlusal and skeletal development in the deciduous dentition. *Eur J Orthod*. 1993; 15: 345.

Varrela J. Early developmental traits in Class II malocclusion. *Acta Odontol Scand*. 1998; 56(6):375-377.

Vaughn K. J. Craft production, exchange, and political power in the pre-Incaic Andes. *Journal of Archaeological Research*. 2006; 14(4): 313-344.

Vega Inca G. de la. *Comentarios Reales*. (1609). Tomo II. Emecé Editores S.A. Buenos Aires. 1943.

Vega Inca G. de la. *Comentarios Reales*. (1609). Libro 8. Capítulo V. Espasa Calpe S.A. Madrid. 2003.

Vesalii A. *De corporis humani fabrica libris septem. Liber primus*. Epítome edición de 1555. Venetii. Facsimil Sankyo Pharma. 2005.

Virchow R. *Crania Ethnica Americana. Sammlung auserles ener amerikanischer Schädel-typen*. Verlag von A. Asher y al. 1892.

Virchow R. Defecte des os tympanicum an künstlich deformirten Schändeln von Peruanen. *Verhandlungen der Berliner Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte*. 1896:69-74.

Viscosi V. y Cardini A. Leaf morphology, taxonomy and geometric morphometrics: a simplified protocol for beginners. *PLoS One*. 2011; 6(10): e25630.

von Cramon-Taubadel N., Frazier B. C. y Lahr M. M. The problem of assessing landmark error in geometric morphometrics: theory, methods, and modifications. *Am. J. Phys. Anthropol.*



2007; 134 (1): 24-35.

Waddington CH. *Principles of Embriology*. [1956 primera edición] George Allen & Unwin Ltd. London. 1962.

Wang M. K., Buschang P. H. y Behrents R. Mandibular rotation and remodeling changes during early childhood. *The Angle Orthodontist*. 2009; 79(2): 271-275.

Wang S., Lewis C.M, Jakobsson M., Ramachandran S., Ray N., Bedoya G., Rojas W., Parra M.V., Molina J.A., Gallo C., Mazzotti G., Poletti G., Hill K, Hurtado A.M., Labuda D., Klitz W., Barrantes R., Bortolini M.C., Salzano F.M., Petzl-Erler M.L., Tsuneto L.T., Llop E., Rothhammer F., Excoffier L., Feldman M.W., Rosenberg N.A. y Ruiz-Linares A. Genetic variation and population structure in native Americans. *PLoS Genet*. 2007, Nov; 3 (11):e185.

Waters M.R., Forman S.L., Jennings T.A., Nordt L.C., Driese S.G., Feinberg J.M., Keene J.L., Halligan J., Lindquist A., Pierson J., Hallmark C.T., Collins M.B. y Wiederhold J.E. The Buttermilk Creek complex and the origins of Clovis at the Debra L. Friedkinsite, Texas. *Science*. 2011, Mar; 331(6024):1599-1603.

Weber G.W. y Bookstein F.L. *Virtual Anthropology: a guide to a new interdisciplinary field*. Vienna: Springer. 2011.

Webster M. y Sheets H. D. A practical introduction to *landmark*-based geometric morphometrics. *Quantitative Methods in Paleobiology*. 2010; 16:168-188.

Weiss P. Tipología de las deformaciones cefálicas de los antiguos peruanos, según la osteología cultural. *Revista del Museo Nacional, Lima, Perú*. 1962.; Tomo XXXI: 15-42.

Weiss P. *Osteología Cultural. 2do. Libro. Prácticas Cefálicas: a) Deformaciones Intencionales de la Cabeza. b) Paleopatología*. 2014, March. In *Anales de la Facultad de Medicina*. 2014, March; 44(2):133-276.

Weiss P. *Osteología Cultural. Prácticas Cefálicas*. Tomo I. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima. 1958.

Weiss P. *Osteología Cultural. Prácticas Cefálicas*. Tomo II .Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima. 1961.



Wellens H. L. L., Kuijpers-Jagtman A. M. y Halazonetis D. J. Geometric morphometric analysis of craniofacial variation, ontogeny and modularity in a cross-sectional sample of modern humans. *Journal of Anatomy*. 2013; 222(4): 397-409.

Whitley D.S. y Dorn R.I. New perspectives on the Clovis vs. pre-Clovis controversy. *American Antiquity*. 1993; 58(4): 626-647.

Wilhelm B. M., Beck F. M., Lidral A. C. y Vig K. W. A comparison of cranial base growth in Class I and Class II skeletal patterns. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2001; 119(4): 401-405.

Wiley, G. R. The prehistoric civilizations of nuclear America. *American Anthropologist*. 1955; 57(3): 571-593.

Yang N.N., Mazières S., Bravi C., Ray N., Wang S., Burley M.W., Bedoya G., Rojas W., Parra M.V., Molina J.A., Gallo C., Poletti G, Hill K., Hurtado A.M., Petzl-Erler M.L., Tsuneto L.T., Klitz W., Barrantes R., Llop E., Rothhammer F., Labuda D., Salzano F.M., Bortolini M.C., Excoffier L., Dugoujon J.M., y Ruiz-Linares A. Contrasting patterns of nuclear and mtDNA diversity in Native American populations. *Annals of Human Genetics*. 2010, Nov; 74(6):525-538.

Zamora C.E. y Inguanzo S. D. *Atlas de cefalometría. Análisis clínico y práctico*. AMOLCA. Caracas. 2003.

Zelditch M.L, Swiderski D.L, Sheets H.D. y Fink W.L. *Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer*. Elsevier Academic Press, New York and London. 2004.





14. INDICE ONOMÁSTICO





- Adams 56, 57, 59, 64, 68, 69, 76, 183, 184,
187, 188, 193, 205, 217
- Admiraal 5, 7, 205
- Allison 37, 205
- Anderson 183, 186, 205
- Andria 99, 184, 205
- Andrushko 14, 205
- Anton 95, 122, 123, 146, 183, 184, 185, 186,
188, 189, 190, 205
- Arkush 10–15, 11–15, 12–15, 13–15, 47–50,
205–232
- Aufderheide 21, 24, 27, 206
- Baab 58, 59, 65, 66, 67, 68, 76, 77, 206
- Bailey 143, 206
- Barbeito-Andrés 100, 105, 106, 206
- Barbieri 6, 8, 206
- Bastir 76, 88, 90, 98, 99, 102, 103, 106, 108,
109, 183, 184, 185, 186, 187, 189, 190,
206, 207, 225
- Battaglia 5, 6, 9, 207
- Bauer 14, 207
- Benítez 57, 58, 84, 207
- Bennett 121, 207
- Beresford-Jones 13, 207
- Berry 121, 207
- Björk 107, 119, 120, 125, 147, 189, 207
- Bodner 7, 8, 207, 211
- Bolender 121, 208
- Bonatto 6, 208, 213, 214
- Bookstein 56, 57, 58, 61, 62, 70, 71, 72, 75,
76, 77, 88, 143, 183, 192, 193, 208, 221,
223, 226, 231
- Bravi 3, 4, 208, 232
- Broca 117, 208
- Brothwell 141, 208
- Buikstra 141, 209
- Burdi 103, 209
- Burger 14, 209
- Burrows 122, 209
- Cabieses 14, 26, 29, 32, 34, 140, 209, 218
- Cardini 65, 71, 74, 75, 77, 209, 230
- Carlson 89, 105, 187, 209
- Casas 15, 24, 25, 37, 209
- Cendekiawan 100, 101, 210
- Chang 183, 210
- Chapdelaine 12, 210
- Chateau 120, 210
- Cheverud 50, 83, 88, 95, 108, 116, 124, 125,
126, 184, 186, 188, 189, 210, 217, 218
- Cieza 15, 24, 37, 185, 210
- Cione 9, 210
- Coben 190, 210
- Cocilovo 21, 192, 211
- Conrad 13, 211
- Cooke 56, 58, 62, 63, 65, 69, 70, 71, 73, 76,
211
- Corruccini 116, 211, 227
- Delaire 37, 120, 121, 211
- Delisle 23, 118, 211
- Del Papa 122, 211
- Dembo 21, 23, 24, 28, 31, 32, 34, 35, 36,
117, 118, 211
- De Saint Pierre 3, 5, 211
- Dhopatkar 98, 183, 211
- Dibbets 184, 211
- Dillehay 4, 6, 7, 9, 10, 212, 226

- Dingwall 23, 24, 27, 32, 37, 212
Dittmar 50, 139, 212
Doig 44, 45, 212
Dryden 59, 212
Dürer XXIII, 69, 212
El-Najjar 122, 212
Enlow XXIV, 23, 55, 95, 96, 99, 100, 103,
104, 107, 108, 109, 183, 185, 186, 188,
189, 190, 212
Escoufier XXX, 76, 85
Fagundes 6, 7, 213, 227
Fehren-Schmitz 7, 8, 47, 213
Fiedel 6, 213
Franchi 71, 213
Frankel 119, 213
Fuselli 8, 213
Gadison 95, 96, 100, 214
García-Hernández 96, 214
Gibbon 118, 214
Gillick 65, 68, 214
Gkantidis 84, 88, 90, 98, 99, 101, 187, 214
Goebel 7, 8, 214
González-José 6, 57, 214, 220, 223, 225
Goswami 71, 73, 86, 88, 214, 215
Gottlieb 122, 215
Gunz 63, 71, 208, 215, 221
Hallgrímsson 98, 100, 127, 187, 190, 215,
219, 220
Hayashi 55, 98, 215
Hennessy 57, 59, 215
Hildwein 183, 215
Hipocrat 21, 215
Hopkin 184, 186, 216
Hoyte 184, 185, 186, 216
Hrdlicka 28, 216
Isbell 13, 44, 216, 227
Isla 44, 225
Jeffery 101, 216
Jiang 97, 216
Jimenez IX, 126, 184, 185, 186, 188
Jiménez 12, 216
Johnston 105, 107, 216
Kabbani 96, 97, 216
Kasai 55, 183, 188, 189, 217
Kendall XXIII, 56, 63, 65, 66, 67, 68, 73, 217
Kerr 183, 184, 217
Kiliaridis 187, 188, 190, 217
Klingenberg 58, 60, 63, 65, 72, 73, 74, 76,
83, 84, 85, 86, 87, 88, 90, 143, 145, 163,
164, 168, 187, 217, 220, 227
Klocke 183, 184, 217
Kohn 55, 116, 125, 126, 186, 188, 189, 210,
217, 218
Kuentz 9, 218
Kuroe 95, 206, 218, 225
Lastres 14, 25, 218
Lauremberg 23, 218
La Vega 190, 218
Lawing 66, 83, 218
Lewis 98, 218, 231
Lieberman 95, 98, 99, 100, 101, 102, 103,
108, 109, 183, 186, 187, 189, 206, 215,
218, 219, 220, 224
Lima 3, 4, 5, 219
Loy 58, 67, 219
Lucker 24, 219

- Lumbreras 9, 10, 12, 13, 46, 219
- Mallory 21, 219
- Mangano 98, 220
- Manríquez 141, 220
- Marcus 56, 57, 225
- Marino 14, 15, 220
- Martínez-Abadías 87, 95, 126, 187, 190,
220, 224
- Martínez-Maza 108, 220
- McCarthy 98, 101, 108, 109, 219, 220
- McIntyre 55, 221
- McNeill 120, 146, 183, 184, 185, 221
- Menzel 123, 221
- Merriwether 6, 7, 221
- Misarti 4, 221
- Mitteroecke 67, 221
- Mitteroecker 63, 71, 88, 208, 215, 220, 221
- Moloy 27, 221
- Monteiro 73, 88, 217, 221
- Morriss-Kay 96, 97, 221
- Moss 89, 95, 103, 104, 105, 106, 118, 119,
120, 121, 122, 123, 125, 146, 183, 184,
185, 186, 187, 188, 189, 190, 222
- Moyers 61, 71, 192, 193, 212, 223
- Munizaga 28, 205, 223
- Neves 6, 223, 225
- Oetteking 118, 183, 184, 223
- Ogura 96, 183, 184, 186, 189, 223
- O'Loughlin 122, 223
- Olson 83, 223
- Opperman 96, 97, 100, 101, 223
- Özbek 22, 224
- Pardal 24, 224
- Paschetta 89, 90, 144, 220, 224
- Pezzia 24, 224
- Polat 183, 184, 186, 224
- Pomeroy 95, 224
- Portugal 15, 224
- Proff 183, 184, 186, 224
- Pucciarelli 6, 7, 8, 122, 206, 223, 224, 225,
226
- Quilter 12, 225
- Reindel 44, 47, 213, 225
- Reiss 48, 49, 116, 117, 225
- Restall 26, 225
- Richtsmeier 55, 56, 63, 64, 83, 84, 90, 97,
220, 225, 229
- Rohlf 56, 57, 58, 75, 85, 143, 146, 205, 206,
225
- Rojas-Sepúlveda 49, 225
- Rosas 76, 88, 90, 98, 102, 106, 183, 184,
185, 186, 187, 189, 190, 206, 207, 218,
225
- Rothhammer 4, 6, 7, 9, 221, 226, 231, 232
- Ruff 127, 226
- Sadler 96, 99, 189, 226
- Santa Cruz-Pachacutic 25, 226
- Santos 6, 7, 8, 14, 213, 214, 220, 226, 227,
228
- Sardi 100, 101, 103, 106, 206, 225, 226
- Sarnat 103, 104, 226
- Schaefer 57, 71, 72, 77, 208, 226
- Schaich 44, 47, 225
- Schendel 38, 122, 226
- Schurr 3, 4, 7, 8, 227
- Scliar 12, 15, 227



- Scott 99, 102, 103, 186, 188, 189, 227
Shimada 139, 227
Shinoda 139, 227
Silverman 44, 227
Singh 71, 88, 100, 183, 186, 189, 227
Slice 56, 58, 63, 68, 76, 205, 219, 228
Slovak 49, 228
Solow 187, 228
Sperber 96, 100, 186, 228
Stanish 11, 12, 13, 228
Stübel 48, 49, 116, 117, 225
Tabachnick 149, 191, 228
Tanabe 184, 228
Tarazona-Santos 6, 7, 8, 213, 227, 228
Tello 27, 33, 35, 36, 37, 44, 45, 123, 140, 228
Thiesen 98, 229
Thomas 21, 22, 229
Thompson 70, 229
Thurstone 149, 229
Tinteroff 43, 44, 229
Tomasto 44, 45, 47, 213, 229
Toro 59, 229
Torres-Rouff 15, 229
Valdez 13, 229
Valeri 61, 229
Van Gijseghem 47, 230
Varrela 183, 187, 230
Vaughn 12, 47, 230
Vega Inca 25, 32, 36, 230
Vesalii XXIII, 22, 23, 230
Virchow 36, 116, 117, 121, 230
Viscosi 71, 74, 75, 77, 230
von Cramon-Taubadel 58, 59, 60, 187
Waddington XXIV, 115, 231
Wang 6, 7, 8, 107, 231, 232
Waters 3, 231
Weber 62, 231
Webster 58, 59, 64, 76, 231
Weiss XXVII, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 33,
34, 35, 36, 37, 117, 119, 123, 125, 140,
231
Wellens 99, 101, 106, 107, 109, 183, 185,
189, 232
Whitley 4, 232
Wilhelm 183, 232
Willey 11, 13, 232
Yang 4, 8, 206, 232
Zamora 146, 232
Zelditch 56, 57, 59, 60, 65, 66, 67, 74, 75,
145, 165, 183, 187, 232





15. APENDICE I





Tabla 15.1 - ANOVA DE UN FACTOR

Descriptivos

		N	Media	Desviación típica	Error típico
SBa<BaBo	no def	39	147,69	11,646	1,865
	circumf	17	140,12	8,543	2,072
	AP	38	135,82	9,392	1,524
	Total	94	141,52	11,520	1,188
<N-S-Bo	no def	39	147,90	4,811	,770
	circumf	17	154,47	5,800	1,407
	AP	38	149,79	4,369	,709
	Total	94	149,85	5,324	,549
<N-S-Ar	no def	39	137,36	5,664	,907
	circumf	17	143,82	7,265	1,762
	AP	38	136,92	5,767	,936
	Total	94	138,35	6,492	,670
<N-S-Ba	no def	39	135,64	4,848	,776
	circumf	17	139,18	6,569	1,593
	AP	38	131,53	3,278	,532
	Total	94	134,62	5,426	,560
<S-N-A	no def	39	85,41	3,647	,584
	circumf	17	84,76	5,190	1,259
	AP	38	87,97	3,062	,497
	Total	94	86,33	3,963	,409
<S-N-B	no def	39	80,26	4,321	,692
	circumf	17	77,12	4,910	1,191
	AP	38	80,13	3,434	,557
	Total	94	79,64	4,230	,436
Ptem <PFc	no def	39	14,92	4,288	,687
	circumf	17	21,59	5,209	1,263
	AP	38	8,68	5,517	,895
	Total	94	13,61	6,824	,704
<Gn-Go /PFc	no def	39	19,38	6,163	,987
	circumf	17	24,71	5,241	1,271
	AP	38	21,87	5,581	,905
	Total	94	21,35	6,035	,622



ANOVA DE UN FACTOR (Continuación)

Descriptivos

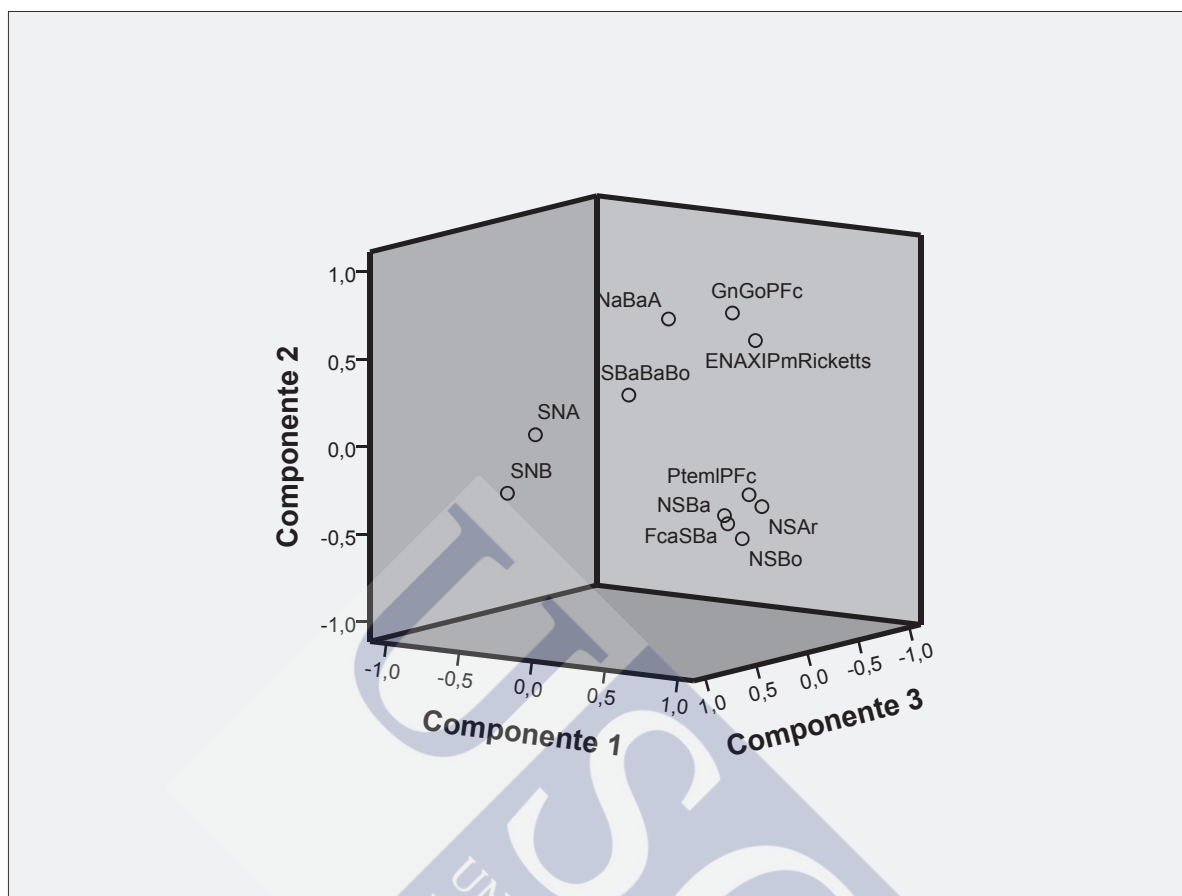
Fca<S-Ba	no def	39	149,92	6,486	1,039
	circumf	17	154,35	7,881	1,912
	AP	38	150,32	3,877	,629
	Total	94	150,88	6,048	,624
<Na-Ba-A	no def	39	34,15	2,641	,423
	circumf	17	36,82	3,187	,773
	AP	38	35,76	1,837	,298
	Total	94	35,29	2,646	,273
ENA-XI-Pm Ricketts	no def	39	39,23	4,976	,797
	circumf	17	42,82	4,503	1,092
	AP	38	41,79	4,061	,659
	Total	94	40,91	4,726	,487
<PFc-NPog	no def	39	89,49	3,858	,618
	circumf	17	87,12	4,076	,988
	AP	38	89,16	2,843	,461
	Total	94	88,93	3,593	,371
<PFc-N-A	no def	39	95,00	3,699	,592
	circumf	17	94,94	4,697	1,139
	AP	38	97,21	2,743	,445
	Total	94	95,88	3,686	,380

Tabla 15.2 - KMO y prueba de Bartlett^a

Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.		,611
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado	240,460
	gl	55
	Sig.	,000

a. Sólo aquellos casos para los que NON DEFORM=0 DEFORM=1 = AP, serán utilizados en la fase de análisis.

Fig. 15.1 - Gráfico de componentes



Obsérvese la agrupación de las diferentes variables en cada uno de los componentes.

Tabla 15.3 - Anova de comparación de scores de PCs

Scheffé

Variable dependiente	(I) NON DEFORM=0 DEFORM=1	(J) NON DEFORM=0 DEFORM=1	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.
PC1	no def	circumf	-1,29997190*	,33844587	,001
		AP	,53104762	,26544419	,141
	circumf	no def	1,29997190*	,33844587	,001
		AP	1,83101952*	,33979506	,000
AP	no def	-,53104762	,26544419	,141	
	circumf	-1,83101952*	,33979506	,000	
PC2	no def	circumf	,12111389	,32431691	,933
		AP	-,51644805	,25436281	,133
	circumf	no def	-,12111389	,32431691	,933
		AP	-,63756195	,32560978	,153
AP	no def	,51644805	,25436281	,133	
	circumf	,63756195	,32560978	,153	
PC3	no def	circumf	1,40093888*	,35346381	,001
		AP	1,10627062*	,27722281	,001
	circumf	no def	-1,40093888*	,35346381	,001
		AP	-,29466826	,35487286	,709
AP	no def	-1,10627062*	,27722281	,001	
	circumf	,29466826	,35487286	,709	

*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.









16. APENDICE II





MIDDLE MENINGEAL ARTERY AS AN INDEPENDENT MODULE IN CRANIOFACIAL GROWTH

Ferros Santos I. DDS ; Jimenez P. DDS ; Santana-Mora U. DDS; Martinez-Insua A. MD
 Facultad de Medicina y Odontología. Departamento de Estomatología.
 Universidad de Santiago de Compostela. Spain.



Fig 1. Placement of the two archaeological settlements in the coastal region of the Central Andean area.

It is assumed that the development and growth of the endocranial structures leads to the final configuration of the calvarian and basicranial bones. The plasticity in the development of the different modules is strongly influenced by environmental factors. Orientation and shape of the meningeal vessels are partially influenced by the cranial base and vault. (O'Loughlin, 1992; Bruner et al., 2009; Klingengerg, 2009)

The deformations of skull made by artificial methods have an ethnocultural pattern. It was an ancient practice developed historically in all continents and in different cultures. These practices it was considered that provide a "natural experiment" for the study of skull. (Cheverud et al., 1992)

Antero-posterior deformation (AP) Fig 2 is achieved by the application of a deforming device formed of rigid elements (occipital and frontal) and a series of tensing textile bands. (Jiménez, et al., 2012). Crania exhibiting AP are characterized by an anteroposterior flattening of the frontal and occipital bones and also present a lateral bulging of the parietals and superior temporal regions. (Anton, 1989)

The middle meningeal artery (MMA) penetrates the cranial cavity through the foramen spinosum (of the sphenoid bone) courses in the middle cranial fossa and it is divided in two or three branches (Bregmatic (br) Obelcic(ob) and lambdatic (la) Fig 3 (Bruner et al., 2009)

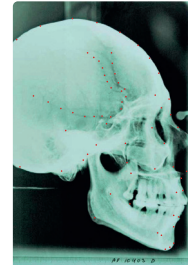


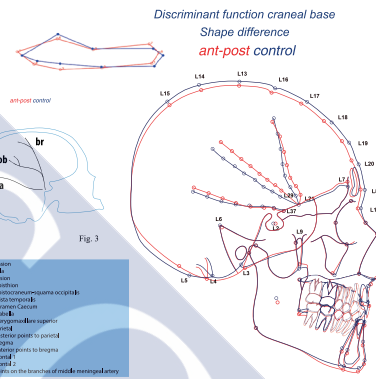
Fig 2. Lateral radiograph of an antero-posterior skull deformation.

Objectives

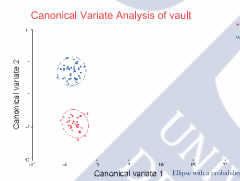
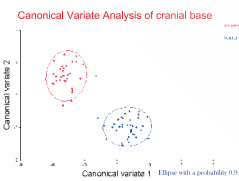
This poster aims to study, in first term, the modularity (or the integration) of the meningeal artery with the cranial base and cranial vault. And, in second term, the influence of the cranial deformation in this structural relationship.

Methods

28 skulls with AP intentional deformation, coming from the Ancón necropolis were compared with a group of 35 apparently undeformed skulls, (U) from the Makal-Tampú area. Both groups are from the Middle Horizon period (Huari Empire) (600-1200 AD) and come from the collections of the department of physical anthropology of The Museo Nacional de Antropología e Historia, in Lima (Perú). All skulls belonged to male skeletons, their sex being determined through secondary traits as cranial volume, muscular insertions, supraclavicular torus, etc. Digital cephalometric and geometric morphometric study was carried on lateral radiographs. The lateral radiographs had been made in a (Planmeca PM CC 2002 Proline, Finland). Images were digitized using a Nikon D70 Camera with a Nikkor 18-70 AF-S ED lens and mounted on a tripod (Kaiser RS2, Germany). Landmark digitations Fig 2 were done employing the programs tpsUtil Version 1.52, tpsDig2 2.16 version by James Rohlf. Posterior analysis were done with the software MorphoJ Klingenberg, C. P. 2011 version 1.05 a".



Results



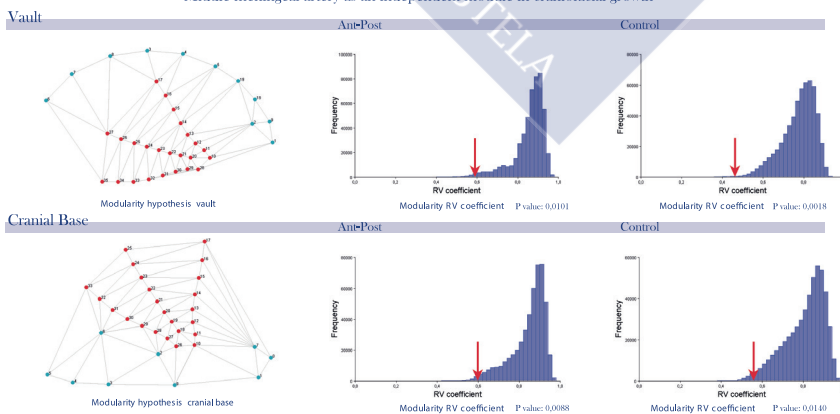
P-values from permutation tests (10000 permutation rounds) for Mahalanobis distances among groups:

Cranial Base	
ant-post	<.0001
Mahalanobis distances among groups:	
ant-post	
control	7,4275

Vault	
ant-post	<.0001
Mahalanobis distances among groups:	
ant-post	
control	8,1051

AP deformed skulls show a contraction of the middle cranial fossa and it is visible the flexion of the clivo foraminal angle (N-Ba-Op). The pterigo-maxillary fossae (pterigomaxillare superior) moves forward and there is also a slight movement backwards of the upper part of the face (glabela and nasion). The AP group also shows, in comparison with the control group, an anterior-posterior vault contraction and an anterior-superior displacement of the MMA obelcic rama.

Middle meningeal artery as an independent module in craniofacial growth



Vault - The AP group shows a little more integration than the controls.

Cranial base - The AP group does not show a significant difference in the modularity pattern when it is compared with the control group.

Conclusions

Intentional cranial deformation significantly changes the shape of vault, base and MMA. Integration and modularity patterns between these three structures are not affected by deformation.

References

Cheverud JM, Kohn LA, Klingenberg LW, Leigh SR. Effects of fronto-occipital artificial cranial vault modification on the cranial base and face. Am J Phys Anthropol. 1992 Jul;88(3):323-45.
 O'Loughlin VD. Comparative endocranial vascular changes due to craniostenosis and artificial cranial deformation. Am J Phys Anthropol. 1996 Nov;101(3):369-85.
 Anton SC. Intentional cranial vault deformation and induced changes of the cranial base and face. Am J Phys Anthropol. 1989 Jun;79(2):235-57.
 Bruner E, Martin S, Ripani M. Landmark-based analysis of the morphological relationship between endocranial shape and traces of the middle meningeal vessels. Anat Rec (Hoboken). 2009 Apr;292(4):518-27.
 Klingenberg C, P. Morphometric integration and modularity in configurations of landmarks: Tools for evaluating a-priori hypotheses. Evolution & Development 11:405-421 (2009)
 Jimenez P, Martinez-Insua A, Franco-Vazquez J, Otero-Cepeda XL, Santana U. Maxillary changes and occlusal traits in crania with artificial fronto-occipital deformation. Am J Phys Anthropol. 2012 Jan;147(1):40-51





CRANIAL BASE MORPHOMETRIC ANALYSIS IN ANTERO-POSTERIOR INTENTIONAL CRANIAL DEFORMATION
 Ferros Santos I. DDS ; Jimenez P. DDS ; Mora MJ. MD; Martinez-Insua A. MD; Santana U. MD.
 Facultad de Medicina y Odontología. Departamento de Estomatología.
 Universidad de Santiago de Compostela. Spain.

Abstract ID#: 259
 IADR
 CEADADR FLORENCE 2013



Fig 1. Placement of the two archaeological settlements in the coastal region of the Central Andean area.

The skull is an intricate mosaic of different modular structures, that develops together, interrelating each other and conditioned by external factors. It is assumed that cranial base plays an outstanding role interconnecting the development of viscerocranium and vault. Some abnormal development of the maxillae had been related with changes in the conformation of the cranial base, (Moss et al., 1960; Martínez-Abadías et al., 2009; Martínez-Abadías et al., 2012)

The deformations of skull made by artificial methods have an ethnocultural pattern being an ancient practice developed historically in all continents and in different cultures, (Anton, 1989; Jimenez et al., 2012)

Antero-posterior deformation (AP) (fig 2) is achieved by the application of a deforming device formed of rigid elements (occipital and frontal) and a series of tensing textile bands, (Jimenez et al., 2012) Crania exhibiting AP are characterized by an anteroposterior flattening of the frontal and occipital bones and also present a lateral bulging of the parietals and superior temporal regions, (Anton, 1989; Jimenez et al., 2012)

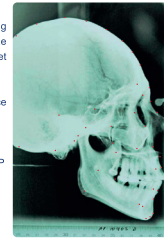


Fig 2. Lateral radiograph of an anteroposterior skull deformation.

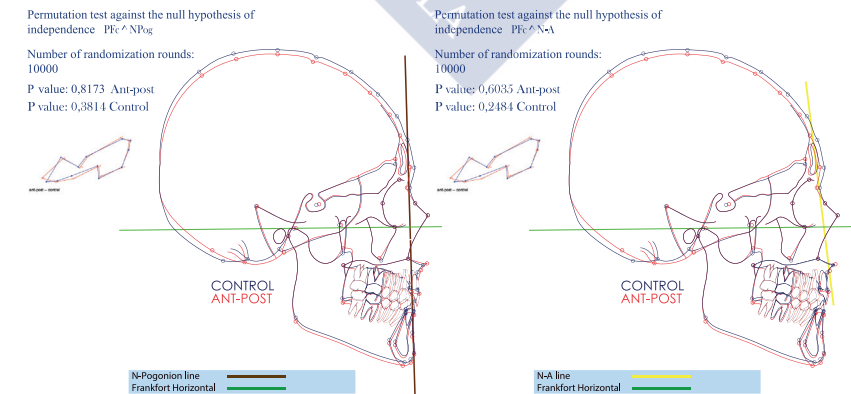
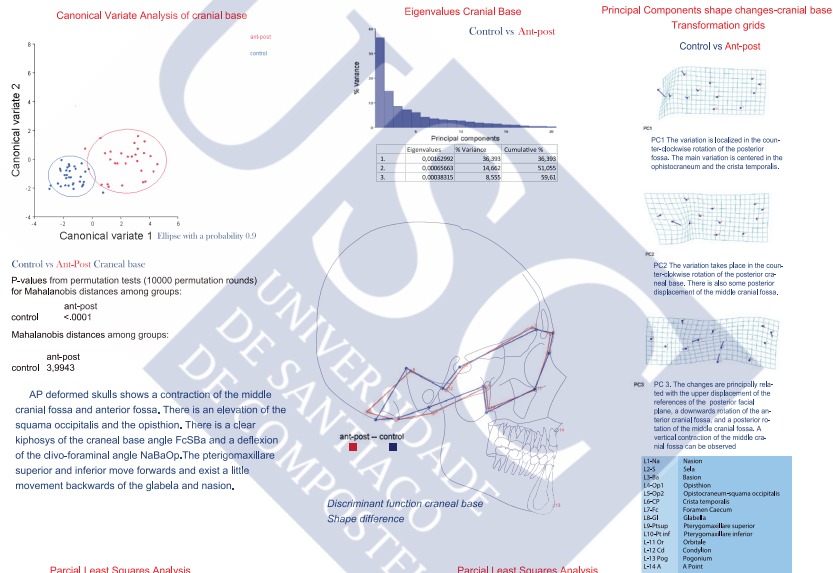
Objectives

The main goal for the present work was, firstly, to determine the differences in the cranial base between deformed and undeformed crania and, secondly, to study the dependence of the maxillary prognathism in those crania, and the relationship with the cranial base alteration.

Methods

28 skulls with AP intentional deformation, coming from the Ancón necropolises were compared with a group of 35 apparently undeformed skulls, (U) from the Makal-Tampú area, (fig 1) Both groups are from the Middle Horizon period (Huari Empire) (600-1200 AD) and come from the collections of the department of physical anthropology of The Museo Nacional de Antropología e Historia, in Lima (Perú). All skulls belonged to male skeletons, their sex being determined through secondary traits as cranial volume, muscular insertions, supraciliary torus, etc. Digital cephalometric and geometric morphometric study was carried on lateral radiographs. The lateral radiographs had been made in a (Planmeca PM CC 2002 Proline, Finland). Images were digitized using a Nikon D70 Camera with a Nikkor 18-70 AF-S ED lens and mounted on a tripod (Kaiser RS2, Germany). Landmark digitations (fig 2) were done employing the programs tpsUtil Version 1.52., tpsDig2 2.16 version by James Rohlf, Posterior analysis where done with the software MorphoJ Klingenberg, C. P, 2011 version 1.05 a'.

Results









17. APENDICE III







Original article

The nasomaxillary complex and the cranial base in artificial cranial deformation: relationships from a geometric morphometric study

Isabel Ferros*, Maria J. Mora*, Idoia F. Obeso*, Publio Jimenez** and Arturo Martinez-Insua*

*Department of Stomatology, Facultad de Medicina y Odontología, Universidad de Santiago de Compostela, **Private Practice, Malaga, Spain

Correspondence to: Arturo Martinez-Insua, Department of Stomatology, Facultad de Medicina y Odontología, Universidad de Santiago de Compostela, Entrerrios s/n, 15705 Santiago de Compostela, Spain. E-mail: arturo.martinez@usc.es

Summary

Introduction: It is widely accepted that there is a relationship between the cranial base and the development of the nasomaxillary complex (NMC). The objective of the present study was to investigate the morphological relationship between these two anatomical units in skulls that have intentionally been subjected to one of two types of artificial deformity of the cranial vault [artificially deformed skulls (ADS)].

Material and methods: A geometric morphometry study was performed on lateral cephalometric X-rays of three groups of crania: 32 with anteroposterior (AP) deformity, 17 with circumferential (C) deformity, and 39 with no apparent deformity.

Results: The cranial base of the ADS showed marked deformity that produced a restriction of AP growth of the NMC, alterations of the roof of the orbit as a consequence of the rotation of anterior cranial fossa, and nasal protrusion. Pronounced morphological differences were found between the three groups: increased vertical development of the maxilla occurred in both ADS groups due to growth of the alveolar process, and rotation of the maxilla and displacement of the orbital rim was observed in the C group. This confirms that the posterior facial plane is regarded as an axial structure that serves as an interface between the middle cranial base and the NMC (Enlow, D.H. and Hans, M.G. (1996) *Essential of Facial Growth*. WB Saunders Co., Philadelphia, PA).

Limitations: It is important to take into account that these results have been obtained from an archaeological sample, with all the limitations that this implies such as being a small sample and with no absolute certainty regarding the use of the same type of deforming device within each group. Furthermore, this is a lateral two-dimensional study in which transverse development has not been analysed.

Conclusions: Artificial modification of the shape of the vault has repercussions on the NMC that support the theory of an all-inclusive integration of the different cranial units in normal as well as in restricted development.

Introduction

The cranial base is a structure that has a close functional relationship with the central nervous system (CNS). Its development is subject to the specific demands of the CNS, of the vessels, of the

nerve trunks and of the meningeal capsule (1, 2). This close inter-relationship extends into adjacent functional matrices (1, 2), with the cranial base acting as a connection between the cranial vault and the viscerocranium. The nasomaxillary complex (NMC) is situated



beneath the anterior cranial fossa, which serves as a platform for its development (3, 4). Embryologically, the anterior cranial base and the viscerocranium both arise from cells of the neural crest, but they undergo distinct ossification processes (5). The cranial base is traversed by several synchondroses and sutures that permit a certain level of morphological reorganization during development and that present a degree of plasticity with respect to environmental factors (4, 6). The speno-ethmoidal synchondrosis (SES) plays a dominant role in the morphological development of the anterior cranial fossa (7) and it is closely associated with the NMC through the orbit and nasal septum (6, 8, 9). The speno-occipital synchondrosis (SOS) is a fundamental structure in the organization of the cranial base and of its flexure and it defines the posterior limits of the NMC (10). Counterpart analysis shows that this synchondrosis interacts with the NMC through the posterior maxillary (PM) plane (3, 11, 12). The cranium is made up of a number of functional units that, despite maintaining their independence, interact in a hierarchical and closely integrated mosaic (3) that guarantees the correct function of this particularly complex structure (13, 14). The NMC is also made up of different functional units: orbit, nasopharynx, and stomatognathic system. These units interact together (4), as has traditionally been advocated by the functional matrix hypothesis (FMH) (1, 2).

Artificially deformed skulls (ADS) give us an excellent opportunity to investigate the degree to which restrictions of the development of the vault and cranial base affect the NMC. These skulls represent a natural experiment (15) in which the cranial growth vectors are redirected (3, 4, 16). Two main types of artificial cranial deformity can be found in skulls from pre-Columbian Peru: anteroposterior (AP) deformity, in which sagittal growth was limited by means of rigid frontal and occipital elements held in place by bandages and circumferential (C) deformity, in which bandages were employed to limit growth of the whole circumference of the vault, producing an extreme mortar-shaped deformity (17, 18). The deforming device was fitted on the newborn infant and was kept in place throughout early childhood (19). The deformity of the vault affected the cranial base and was thus propagated to the viscerocranium, with alteration of the transverse diameters of the temporo-mandibular joints and of the jaws (15, 20–22). Some authors have detected increased facial height (15, 20, 21, 23). AP alterations of the NMC (15), with morphological changes affecting the orbit and the nose (20, 21), appear to be the most relevant; there is considerable discrepancy between authors, however, regarding changes in the jaws (20, 21, 23). As the maxilla is a structure that forms part of the stomatognathic system,

its morphology will also be affected by its function and by its relationship with the mandible (24) due to eruption of the teeth (25) and because its development occurs at a later stage (3).

Relatively few studies in the field of orthodontics have used geometric morphometrics (GM) as a tool for analysis of the cranial base (26) and of its relationship with the jaws (11, 12, 27). Studies of ADS using these methods are also scarce (15, 21, 28). GM analysis has a series of advantages over traditional cephalometric studies of angles and lengths: results are not affected by differences in the size of the different specimens because the technique uses standardized values; the Procrustes superimposition of landmarks creates an inter-relationship between the landmarks and each one of them becomes a variable, thus making it possible to perform multivariate analysis; and the thin-plate spline (TPS) grid allows us to visualize the areas in which the variance is concentrated and the magnitude of that variance (29, 30).

The objective of the present study was to investigate the influence of deformity of the cranial base on the position of the NMC in skulls with artificial AP and C deformities. Two working hypotheses were defined: Hypothesis 1 stated that the shape and sagittal position of the units that make up the NMC were not affected by deformity of the neurocranium. Hypothesis 2 stated that there was no difference in the morphological alterations of these structures caused by the two types of deformity. To the best of the authors' knowledge, this is the first time that nasomaxillary morphology and the configuration of the cranial base have been studied in ADS using GM analysis.

Material and methods

For the study, we used 88 skulls of precontact Amerindian adults from the Central Andean coastal region. The skulls were drawn from the collections of the National Museum of Archaeology, Anthropology and History of Peru. The skulls with cranial deformity were divided into two groups, classified visually and according to their origin (18) (Figure 1). These crania came from the Middle Horizon period (600–1000 CE) (31). Thirty-two skulls from Ancon presented AP cranial deformity, 17 skulls from the burial sites at Cerro Colorado, Arena Blanca, and Cabeza Larga in Paracas had circumferential (C) cranial deformity. The remaining 39 skulls from Makatampu (Lima) presented no apparent cranial deformity and were used as the control group. The age range was determined by closure of the SOS and by the presence of the third molar and its degree of attrition (32). The following inclusion criteria were applied to the three groups:



Figure 1. Artificially deformed skulls used in the present study. Left: circumferential (C) deformity. Right: anteroposterior (AP) deformity.

1. integrity of the cranial structures, taking special care regarding the presence of upper and lower jaws and of the dental arches; 2. male skulls, with rejection of those specimens without this characteristic (33); and 3. absence of marked ex visu asymmetry of the cranial vault and of the jaws to reduce the bias in the superimposition of the bilateral landmarks and to avoid, as far as possible, the compensatory growth processes described in these crania (34).

After fixing the crania on a cephalostat, lateral teleradiography was performed using a Proline PM 2002 CC X-ray device (Planmeca Corporation, Finland). The images obtained were digitized using a Nikon D70 camera with a Nikkor 18-70 AF-S ED objective, mounted on an RS2 copy stand (Kaiser, Germany). The landmarks were digitized using the tpsUtil version 1.52 and tpsDig2 version 2.16 software (35). The landmarks used to define both the cranial base and the NMC were mainly of types 1 and 2, with some type 3 landmarks (29) (Table 1; Figure 2). The landmarks were established by one of the authors (IF) and reviewed by another author. The error of identification of the landmarks (measurement error) was determined by repeating the marking of 10 crania on two different occasions after an interval of 2 weeks. An analysis of variance study was performed and showed no significant difference between the repeated samples, indicating that the error of measurement (4%) was less than the variation between subjects. The GM analysis was performed using the MorphoJ software, version 1.05 a* (36). Principal components analysis (PCA) was used initially on the overall sample in order to determine the patterns that explained the variability of the Procrustes superimposition in the shape space. The first principal components (PCs) were studied in order to define the morphological changes that differentiated the sample. A multiple analysis of variance test (IBM SPSS 20, Chicago, Illinois, USA) was used to calculate

the significance of the difference between PCA scores. The discriminant dimensions were studied using canonical variate analysis (CVA), determining the Procrustes distances. Discriminant function analysis (DFA) was employed to examine the anatomical differences and to determine the separations between the means of the different groups (30). The goodness of the initial ex visu classification was checked a posteriori using DFA. Study of the deformity in TPS and wireframe enabled us to visualize the scores and to determine those regions of the cranial base in which compression occurred and those others areas in which the result was a compensatory expansion. It was also possible to identify the areas with a more stable interface (30, 36). Significance was established as an alpha value of 0.05.

Results

The first eight PCs accounted for 66% of the total variance. The point of inflection of the eigenvalue curve occurred at PC5, with a cumulative variance of 54%. PC5 was the last PC to present a variance over 5% (6.2%); the remaining PCs could therefore be considered of low relevance for differentiation between groups (30). PC1 accounted for 20% of the variance and significantly separated the AP group from the control group and from the C group ($P < 0.001$ for both differences). This PC showed changes in the shape of the anterior and posterior poles of the cranial base, with little alteration of the clivus. It also showed rotation of the maxillary plane and of the alveolar apophysis. PC2 accounted for 12% of the variance and significantly separated the AP group from the control group ($P < 0.001$) and the C group from the control group ($P < 0.015$). PC2 the changes in the shape with anterior displacement of the clivus, changes in the anterior pole and posterior pole of the cranial base, rotation of the roof

Table 1. Cranial landmarks employed in this study, landmark numbers are represented in Figure 2.

Landmark	Cranial landmarks	Cranial landmarks definition
1	Nasion	Frontonasal suture. Midline
2	Sella	Centre of the sella turcica (pituitary fossa). Midline
3	Basion	Lowermost and anteriormost point on the anterior margin of the foramen magnum. Midline
4	Bolton point	Highest point of the curvature between the occipital condyle and the lower border of the occipital bone. Midline
5	Squama	Point of the maximum convexity of the outer contour of the occipital squama. Midline
6	Crista temporalis	Most posterior point of the middle cranial fossa, at the temporo-parietal junction. Lateral
7	Foramen coecum	Most anterior point of the cribriform plate in the junction with the frontal tabula interna. Midline
8	Glabella	Most prominent point of the supraorbital ridge. Midline
9	Orbitale superior	Uppermost point of the superior border of the orbital ridge. Lateral
10	Orbitale posterior	Most posterior point of the lateral orbital ridge. Lateral
11	Pterygopalatine fossa	Most postero-superior point of the pterygopalatine fossa. Lateral
12	Pterygomaxillary fissure	Most inferior point of the pterygomaxillary fissure. Lateral
13	Zygoma	Most inferior point in the outer contour of the zygomatic process. Lateral
14	Infraorbitale	Most inferior point of the lower border of the orbital cavity. Lateral
15	Anterior nasal spine (ANS)	Most anterior bony projection of the floor of nasal cavity. Midline
16	Posterior nasal spine (PNS)	Most posterior point of the hard palate. Midline
17	Incisal	Most occlusal point of the palatal alveolar ridge. Midline
18	Prosthion	Most occlusal point of the buccal alveolar ridge. Midline
19	Subspinale (A)	Deepest point on the concavity between ANS and prosthion. Midline
20	Glenoid	Deepest point on the contour of the glenoid fossa. Lateral
21	Wing	Junction between the jugum sphenoidale and the ala major. Lateral
22	Nasal inferior	Most anterior and inferior point on the nasal bones. Midline
23	Nasal medium	Mid-point between nasion and nasale inferior. Midline
24	Pyramiformis	Most posterior point of the pyramiformis border in the maxilla. Lateral



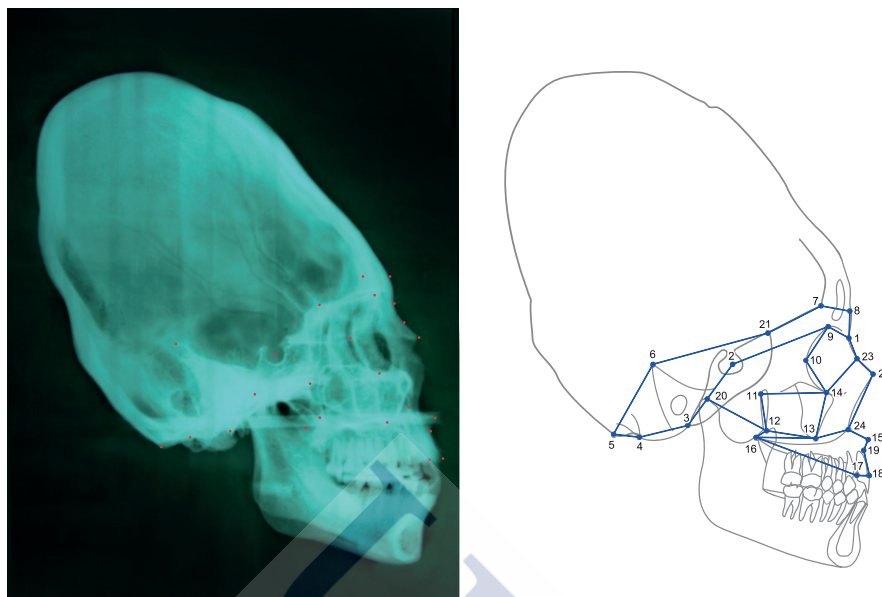


Figure 2. Left: X-ray of a circumferentially deformed skull with the landmarks. Right: wire frame and landmarks used in the analyses. See Table 1 for a definition of the landmark positions.

of the orbit, and variations in the vertical maxillary dimension. The combination of PC1 and PC2 separated the three groups morphologically (Figure 3). PC3 was associated with maxillary protrusion and frontonasal and orbital retrusion. It separated the C group from the control group ($P < 0.001$) and accounted for 9% of the variance. PC4 separated the two deformed groups (C and AP) from the control group ($P < 0.001$), though it only accounted for 7.8% of the total variance; the most relevant changes were in the middle cranial base, posterior cranial base, and in the nasal area.

The CVA study (Figure 4) defined two axes that separated the morphological variation of the sample. CV1 (with 56.2% of the variance) showed that the anterior and posterior poles of the cranial base and the anterior and posterior extremes of the maxilla were the elements that best discriminated the deformity. The negative loading was found in the C deformity and control groups and the positive loading in the AP deformity group. Positive loading reflected changes in the posterior cranial fossa and frontonasal retrusion with maxillary protrusion. CV2, which give the 43.7% of the variance, separating the C group from the other two groups. The positive loading of the C group referred to rotation of the maxilla (ante-rotation), to the upward and backward displacement of the anterior cranial fossa and to the forward and downward displacement of the clivus. The permutation test (10000 permutations) (36) for the Procrustes distances between the groups produced a significant difference ($P < 0.0001$) between all groups (Table 2).

The DFA also showed that no cranium was misclassified on visual examination, with a confidence level of $P < 0.0001$. The specific characteristics of each deformity are highly discriminant.

The morphological patterns can be seen graphically on the superimposed wireframes between the DFA means (36) (Figures 5–7).

Morphological alterations common to both deformities:

NMC

1. Increased anterior vertical dimension, more marked in the C group.
2. Antero-inferior growth of the alveolar process that provoked protrusion of the prosthion.

3. Point A practically unchanged, with minimal protrusion in the C group.
4. Downward and forward displacement of the nasal bones.
5. Maintenance of the PM plane with slight forward displacement.

Cranial base

1. Backward and upward displacement and rotation of the cribriform plate, more significant in the C group; this causes backward displacement of the roof of the orbit.
2. Forward and downward displacement of the clivus.
3. Closure of the clivo-foraminal angle.
4. Increased sagittal diameter of the foramen magnum and elevation of the occipital squama.

Group-specific changes:

1. AP deformity group

NMC

- Backward displacement of the nasion
- Protrusion of the anterior nasal spine
- Reduced posterior vertical dimension of the pterygomaxillary fissure

Cranial base

- Closure of the angle of the cranial base
- Backward displacement of the occipital squama

2. Circumferential deformity group

NMC

- Backward and upward displacement of the orbit
- Ante-rotation of the maxilla
- Backward displacement of the posterior nasal spine

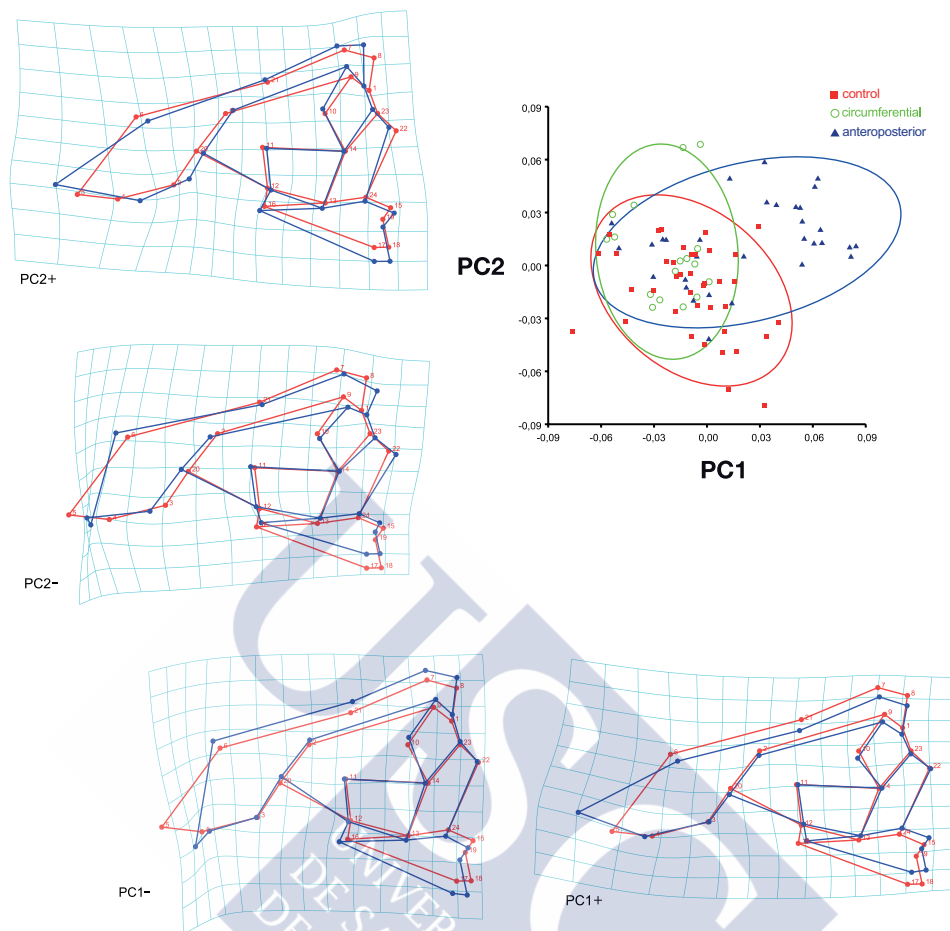


Figure 3. Scatter plot (with 80% confidence ellipses) of the first and second principal components (PC1 and PC2) [anteroposterior deformity (AP), blue triangles; circumferential deformity (C), green circles; Control, red squares] and thin-plate spline transformation grids with shape change vectors for the positive and negative values of the corresponding PCs. Observe PC wire frames and transformation grids with the tendencies of morphological changes. Red frame: neutral value; blue frame: ±maximum tendency. See Table 1 for a definition of the landmark positions.

- Counter clock wise rotation of the anterior profile of the zygomatic bone
- Cranial base
- Opening of the angle of the cranial base
 - Elevation of the crista temporalis.

On the basis of these results, the working hypotheses were rejected.

Discussion

Summary of key findings

The results of this study show that artificial AP and circumferential cranial deformities induced morphological changes in the cranial base and that these alterations were propagated to the NMC. Even anatomical units as distant from the original deformity as the maxilla are affected. The two types of vault deformity provoke different morphological alterations of the base of the cranium and of the NMC.

Strengths and limitations

This method of analysis gives us an overall picture of the morphological changes of the complete anatomical structure and makes it

easier to locate the subunits or areas of those subunits that have undergone greatest change (30, 36). The PC analysis shows us the variance both between the different groups and within the individual groups and enables us to see where the morphological changes are most intense and the predominant patterns in each type of cranium. It is important to realize that this study is limited by the specific characteristics of an archaeological sample and that part of the morphological variability is not included in the PCs studied. In this study, the C group was small, which could have reduced the strength of the statistical signal; however, this was outweighed by the high level of coherence and the homogeneity of the group in the plots of the PCA (Figure 3) and of the CVA (Figure 4). It can thus be stated that this was a small but homogeneous group that seems representative.

Changes affecting the NMC

The two ADS groups used in this study showed two types of response to two distinct deforming actions. According to the balloon model hypothesis (3), the AP deformity is characterized by AP growth restriction with medial-lateral compensation (15, 22), whereas the C deformity presents a medial-lateral and supero-inferior restriction, producing an AP compensation (21). Because of this, it has been reported in the literature that the AP deformity leads to



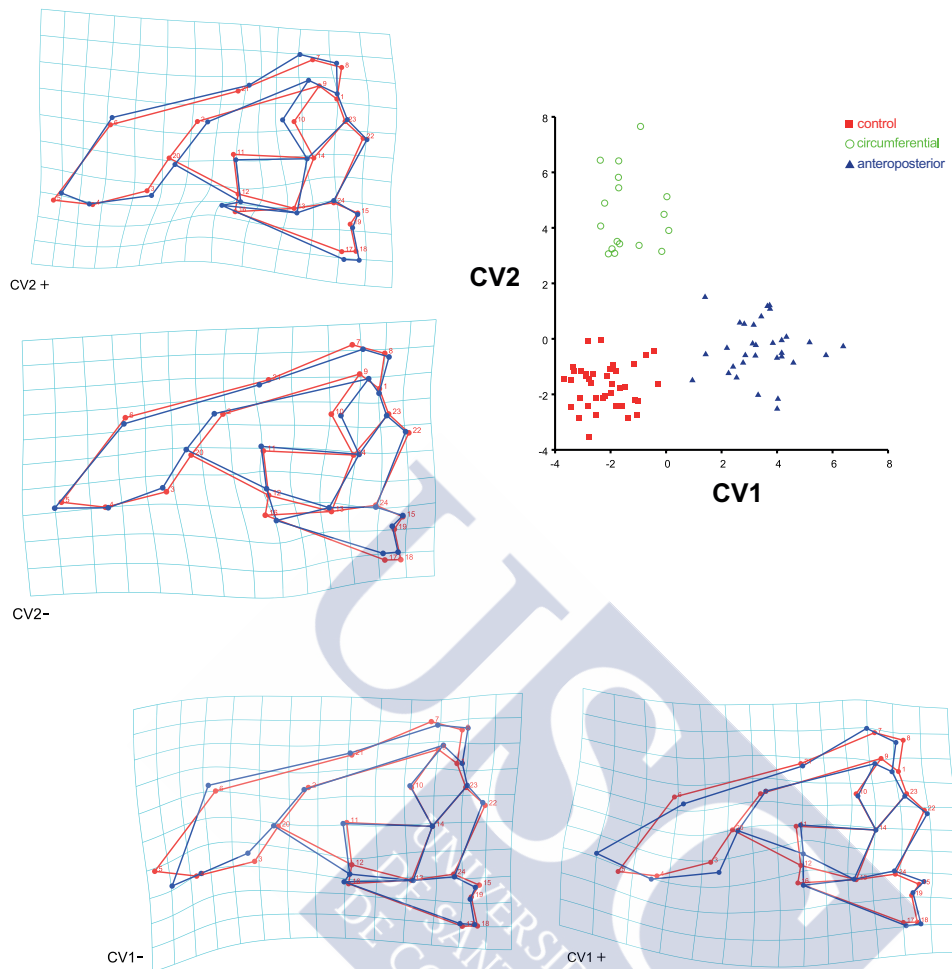


Figure 4. Scatter plot of canonical variate analysis (CVA) [anteroposterior deformity (AP), blue triangles; circumferential deformity (C), green circles; Control, red squares]. The three groups are clearly differentiated. Shape variation along the corresponding axis is shown by the thin-plate spline transformations (red wire: neutral value; blue frame: \pm maximum tendency). Useful traits for discriminating between groups are revealed. See Table 1 for a definition of the landmark positions.

Table 2. Procrustes distances and *P* values for permutation tests for Procrustes among groups.

	Control	Circumference
Circumference	0.0625 (<i>P</i> < 0.0001)	
Anterior–posterior	0.0600 (<i>P</i> < 0.0001)	0.0651 (<i>P</i> < 0.0001)

shortening of the NMC in the AP plane, whereas the C deformity produces lengthening of the NMC in the AP plane (15, 21). The results obtained in our study clarify and contradict these statements. In the AP group, protrusion of the nasal bones and of the anterior nasal spine does occur, but point A is not affected and the nasion and glabella undergo backward displacement (Figure 5); this could be an effect of propagation of the compression of the cranial base through the nasal septum (6). In the C group, protrusion of the anterior nasal spine was not observed but slight protrusion was detected in the nasal bones, and there was retrusion of the glabella (Figure 6). The protrusion affecting the prosthion in both the AP and the C deformities was related to alveolar compensation, which was clearly visible (particularly in the C group) and has been reported previously (20,

22). This alveolar compensation, responsible for a large part of the intergroup variance, was probably caused mainly by the processes of tooth eruption, to migration of the tooth germs through the maxilla (25) and to occlusal factors, which will have had a compensatory effect to preserve the function of the stomatognathic system (24). There is no net forward displacement of the maxilla, as has been suggested after closure of the cranial base angle (8) or when the anterior cranial floor rotates upwards and backwards (6). In fact, there is AP compression of the NMC in both groups, particularly in the space between the pyriform aperture and nasion anteriorly and the PM plane posteriorly. In this area, there is backward and upward displacement of the orbital rim in the C group (4, 20), but these changes in the orbit are minimal in the AP group. Compression of this space also affected the zygomatic-malar region, which presented compression and ante-rotation in the C group and only compression and posterior vertical restriction in the AP group.

Role of the PM plane

Compression in the area of the tuberosity, an area responsible for pushing the NMC forward and downward (3), was detected in both deformities. This compression occurred due to the forward

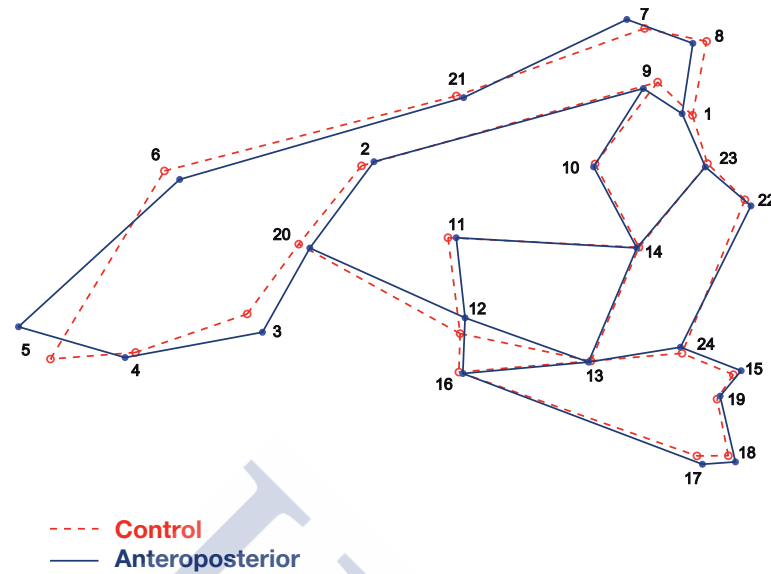


Figure 5. Morphological mean differences revealed by discriminant function analysis (DFA); wire frame representation of the control group and the anteroposterior group. Differences are increased 1.5 times. See Table 1 for a definition of the landmark positions.

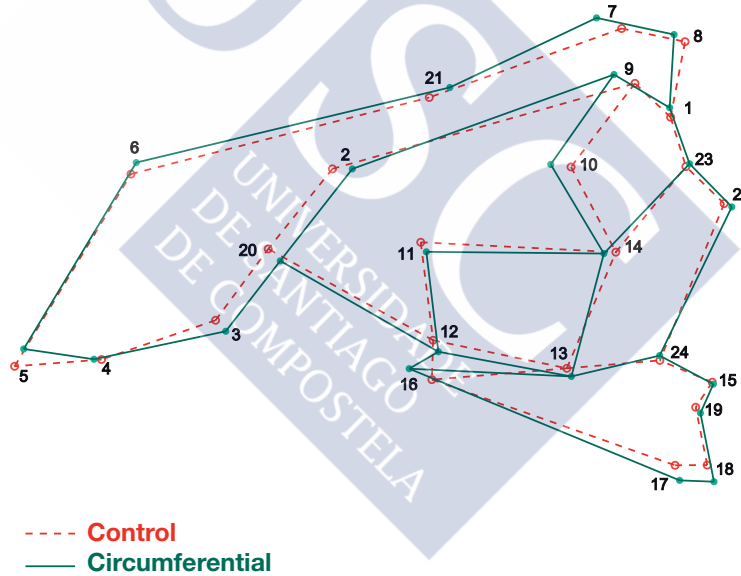


Figure 6. Morphological mean differences revealed by discriminant function analysis (DFA); wire frame representation of the control group and the circumferential group. Differences are increased 1.5 times. See Table 1 for a definition of the landmark positions.

displacement of the PM plane. In the C group, this displacement of the PM plane did not affect the posterior nasal spine, which was involved in the post-rotation of the maxilla and in its antero-posterior elongation (20). In the AP group, in contrast to what has been reported in another study (23), we detected an increase in the AP dimension of the maxilla, produced by changes in the premaxilla. The PM plane is a vertical plane that acts as an interface between the middle cranial fossa and the NMC. Its definition as an axis that separates two vertical modules (3, 11, 12) is supported by the results of our study; the large compensatory displacements occurred on either side of this axis, but the plane defined by the landmarks of the sphenoid wing and pterygomaxillary fissure only underwent slight forward

displacement. Through the pterygoid apophysis, the PM plane acts as an element that transmits the plasticity of the cranial base (7).

Changes affecting the cranial base

It is very possible that a large part of the pressure exerted by the growth of the encephalon is redirected (16) through rotation of the cribriform plate (20). This upward and backward rotation of the anterior pole of the anterior cranial fossa occurs around the fulcrum of the SES (wing landmark), and it is particularly noticeable that a structure traditionally considered to be very stable (7) undergoes such marked changes in both types of deformity. Despite its endochondral origin (5), this structure has great plasticity, satisfying the principles of the FMH that no



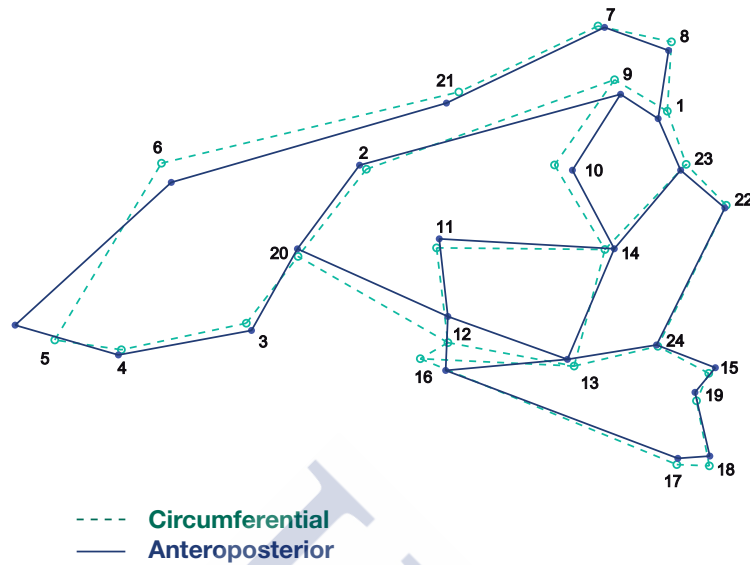


Figure 7. Morphological mean differences revealed by discriminant function analysis (DFA); wire frame representation of the anteroposterior group and the circumferential group. Differences are increased 1.5 times. See Table 1 for a definition of the landmark positions. Note the morphological variation in the orbital and nasal region, the occipital squama, and the nasal posterior spine (NPS) region. Note also the similarities in the clivus.

bone has a predetermined topographic position (16). Shortening of the anterior cranial fossa in the ADS led to antero-posterior constriction of the NMC, which has been noted previously in other situations (9). This rotation of the anterior cranial fossa and the development of the maxilla below the fossa produce an increase in facial height (15, 20, 21, 23).

In the middle cranial fossa, the late closure of the SOS (10) implies that the pressure of the encephalon (16) displaced the clivus forward and downward; in the C group, this displacement did not provoke closure of the angle of the cranial base; in fact, the marked rotation of the cribriform plate produced platybasia (20). In the AP group, there was less compensation in the cribriform plate and closure of the angle did occur. There was a clear displacement of the occipital squama in the posterior cranial fossa and marked changes around the foramen magnum that accounted for a large part of the variance (Figures 3 and 4). The increase in the sagittal dimension of the posterior cranial fossa and its ventral rotation, together with closure of the clivo-foraminal angle, can be explained by the pressure produced by growth of the infratentorial part of the encephalon (16, 20).

Integration

The results obtained in our study show that there is a degree of integration between the cranial base and the NMC. There is integration between neighbouring structures within the same functional unit, but there is also some degree of integration between more distant structures that do not share functional characteristics. The cranium has a high degree of plasticity, and even structures with endochondral ossification, such as the cranial base, can be modified by environmental factors acting during the development phase of those structures (16, 34). The morphological development and final configuration of the cranial structures is the result of a combination of factors (13): genetic determinants, functional requirements, and environmental factors. The strict hierarchical integration of all the different functional units guarantees the function and development of such a complex structure (3, 11), even when subjected to

environmental aggression as limiting as the intentional deformity of the vault. It is very likely that the deforming elements were only kept in place until 4 or 5 years of age (19) but, as we have noted, this has a marked effect on synchondroses that close years later, and these structural alterations of the cranial base cause the growth of the viscerocranium to follow a pre-established pattern, in a compensatory manner, with the aim of maintaining function. In conclusion, there is a pervasive integration of the different functional units (28) that confirms that the cranium itself is much more than the sum of the development of a series of different, independent parts (1, 2).

Conclusions

The cranial base of the ADS showed marked deformity that produced an antero-posterior constriction of the NMC. Morphological changes common to both deformities include increased growth of the alveolar process of the maxilla, anterior displacement of the pterygomaxillary plane, alterations of the roof of the orbit, and forward and downward displacement of the clivus. In addition, there are changes specific to each type of deformity. In the C group, rotation and antero-posterior elongation of the maxilla were observed. In the AP group, there was naso-orbital retrusion. The artificial modification of the shape of the vault has consequences on the NMC that support the theory of an all-inclusive integration of the different cranial units and that indicate that this is the basis for development not only under normal conditions but also in situations of extreme restriction.

Acknowledgements

The authors thank the directors and staff of the Museo Nacional de Antropología Arqueología e Historia del Perú (MNAAH) of Lima for granting them access to the collections, particularly Patricia Maita, Flor Bovadin, Lizbeth Briceño, and Dr. Hilda Vidal for their help and advice. They also thank Carlos A. Murga, museum curator, for his kind assistance and the rest of staff of the MNAAH Physical Anthropology Department for their availability. The

authors show their gratitude to Dr Rubén Carretero DDS (Lima) for his help and advice gathering the X-ray images and Prof. Klingenberg for his kind help and advice in morphometry.

References

- Moss, M.L. (1971) Functional cranial analysis and the functional matrix. In *Patterns of Orofacial Growth and Development*. American Speech-Language and Hearing Association Reports, Ann Arbor, MI, pp. 5–18.
- Moss, M.L. (1997) The functional matrix hypothesis revisited. 1. The role of mechanotransduction. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 112, 410–417.
- Enlow, D.H. and Hans, M.G. (1996) *Essential of Facial Growth*. WB Saunders Co., Philadelphia, PA.
- Lieberman, D.E., Pearson, O.M. and Mowbray, K.M. (2000) Basicranial influence on overall cranial shape. *Journal of Human Evolution*, 38, 291–315.
- Sadler, T.W. (2006) *Langman's Medical Embryology*. Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore, MD, 10th edn.
- Scott, J.H. (1967) *Dentofacial Development and Growth*. Oxford Pergamon Press, Oxford, UK.
- Björk, A. (1955) Cranial base development: a follow-up x-ray study of the individual variation in growth occurring between the ages of 12 and 20 years and its relation to brain case and face development. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 141, 198–225.
- Kasai, K., Moro, T., Kanazawa, E. and Iwasawa, T. (1995) Relationship between cranial base and maxillofacial morphology. *European Journal of Orthodontics*, 17, 403–410.
- Lieberman, D.E. (1998) Sphenoid shortening and the evolution of modern human cranial shape. *Nature*, 393, 158–162.
- Coben, S.E. (1998) The spheno-occipital synchondrosis: the missing link between the profession's concept of craniofacial growth and orthodontic treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 114, 709–712.
- Bastir, M. and Rosas, A. (2006) Correlated variation between the lateral basicranium and the face: a geometric morphometric study in different human groups. *Archives of Oral Biology*, 51, 814–824.
- Wellens, H.L.L., Kuijpers-Jagtman, A.M. and Halazonetis, D.J. (2013) Geometric morphometric analysis of craniofacial variation, ontogeny and modularity in a cross-sectional sample of modern humans. *Journal of Anatomy*, 222, 397–409.
- Hallgrímsson, B., Lieberman, D.E., Young, N.M., Parsons, T. and Wat, S. (2007) Evolution of covariance in the mammalian skull. *Novartis Foundation Symposium*, 284, 164–190.
- Bastir, M., Rosas, A. and O'Higgins, P. (2006) Craniofacial levels and the morphological maturation of the human skull. *Journal of Anatomy*, 209, 637–654.
- Cheverud, J.M., Kohn, L.A.P., Konigsberg, L.W. and Leigh, S.R. (1992) Effects of fronto-occipital artificial cranial vault modification on the cranial base and face. *American Journal of Physical Anthropology*, 88, 323–345.
- Moss, M.L. (1958) The pathogenesis of artificial cranial deformation. *American Journal of Physical Anthropology*, 16, 269–286.
- Dembo, A. and Imbelloni, J. (1938) Deformaciones intencionales del cuerpo humano de carácter étnico. Sección cuarta. De la deformación cefálica. *Buenos Aires. José Anesi*, 228–338.
- Weiss, P.H. (1961) *Osteología Cultural. Prácticas cefálicas*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Peru, vol. 2.
- de la Vega, G. (1609) [2003] *Comentarios Reales*. Espasa Calpe, Madrid, Spain, pp. 565–568.
- Antón, S. (1989) Intentional cranial vault deformation and induced changes of the cranial base and face. *American Journal of Physical Anthropology*, 79, 253–267.
- Kohn, L.A.P., Leigh, S.R., Jacobs, S.C. and Cheverud, J.M. (1993) Effects of annular cranial vault modification on the cranial base and face. *American Journal of Physical Anthropology*, 90, 147–168.
- Jimenez, P., Martínez-Insua, A., Franco-Vazquez, J., Otero-Cepeda, X.L. and Santana, U. (2012) Maxillary changes and occlusal traits in crania with artificial fronto-occipital deformation. *American Journal of Physical Anthropology*, 147, 40–51.
- Ogura, M., Al-Kalaly, A., Sakashita, R., Kamegai, T. and Miyawaki, S. (2006) Relationship between anteroposterior cranial vault deformation and mandibular morphology in a pre-Columbian population. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 130, 535–539.
- Kiliaridis, S., Johansson, A., Haraldson, T., Omar, R. and Carlsson, G.E. (1995) Craniofacial morphology, occlusal traits, and bite force in persons with advanced occlusal tooth wear. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 107, 286–292.
- Enlow, D.H. and Bang, S. (1965) Growth and remodeling of the human maxilla. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 51, 446–464.
- Singh, G.D., McNamara Jr, J.A. and Lozanoff, S. (1997) Thin-plate spline analysis of the cranial base in subjects with Class III malocclusion. *European Journal of Orthodontics*, 19, 341–353.
- Rosas, A., Bastir, M., Alarcón, J.A. and Kuroe, K. (2008) Thin-plate spline analysis of the cranial base in African, Asian and European populations and its relationships with different malocclusions. *Archives of Oral Biology*, 53, 826–834.
- Martínez-Abadías, N., Paschetta, C., De Azevedo, S., Esparza, M. and González-José, R. (2009) Developmental and genetic constraints on neurocranial globularity: insights from analyses of deformed skulls and quantitative genetics. *Journal of Evolutionary Biology*, 36, 37–56.
- Bookstein, F.L. (1991) *Morphometric Tools for Landmark Data*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Zelditch, M.L., Swiderski, D.L., Sheets, H.D. and Fink, W.L. (2004) *Geometric Morphometrics for Biologists. A Primer*. Elsevier Academic Press, San Diego, CA.
- Lanning, E.P. (1967) *Peru Before the Incas*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1st edn.
- Brothwell, D.R. (1981) *Digging Up Bones: The Excavation, Treatment and Study of Human Skeletal Remains*. British Museum Press, London, 3rd edn, pp. 71–72.
- Buikstra, J.E. and Ubelaker, D.H. (1994) *Standards for Data Collection From Human Skeletal Remains*. Arkansas Archaeological Survey Research Series, Fayetteville, AR, p. 44.
- Björk, A. and Björk, L. (1964) Artificial deformation and cranio-facial asymmetry in Ancient Peruvians. *Journal of Dental Research*, 43, 353–362.
- Rohlf, F.J. (2010) tps Utility program version 1.46 and tpsDig version 2.16 Department of Ecology and Evolution. State University of New York at Stony Brook. Available from <http://life.bio.sunysb.edu/morph>.
- Klingenberg, C.P. (2011) MorphoJ: an integrated software package for geometric morphometrics. *Molecular Ecology Resources*, 11, 353–357.

