



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

EL CRÁNEO: UNA MIRADA DESDE LA MORFOLOGÍA PARA LA ANTROPOLOGÍA FORENSE

Isla Yolima Zumaij Campos Varela

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Medicina, Departamento de Morfología
Ciudad, Colombia
2017

EL CRÁNEO: UNA MIRADA DESDE LA MORFOLOGÍA PARA LA ANTROPOLOGÍA FORENSE

Isla Yolima Zumaij Campos Varela

Trabajo de final presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Morfología Humana

Director

Luis Enrique Caro Henao

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Medicina, Departamento de Morfología
Ciudad, Colombia

2017

A la señora Stella y el señor Do, sin ellos ni una palabra, ni un dibujo, ni una sonrisa habría sido posible.

A los cadáveres, por enseñarme e inspirarme a aprender cada día más para entender las historias que tienen para contarme a través de sus huesos.

Agradecimientos

A María Cristina Romero por su inmenso apoyo, sin el que hubiera sido imposible realizar este documento, a William Vargas por explicar con muchos dibujos y sencilleces la complicada biomecánica.

¡A Nadia Vergel por todo! A Luisa Hernández, por su acompañamiento y palabras de ánimo, a Edwin Buitrago y César Cortes por la paciencia de leer, de corregir y de criticar. A Oren Yogev por ayudarme a dibujar, pero sobre todo, por existir tan lejos de su país para venir a caminar conmigo.

A Jenny Valderrama por acompañarnos, a Stella Varela, a Juan de Dios Varela, Laura Varela y Ana Luisa Velandia por su cariño, apoyo incondicional, su paciencia, acompañamiento, que nunca podré terminar de agradecer y por hacer más de mil veces la más odiosa de todas las preguntas: “¿Cómo va la tesis?”.

A Edna Buitrago, Ángela Salgado, Clara Valderrama, Diana Díaz, Mónica Chapetón, Karen Quintero, María Inés Barreto, Carlos Bacigalupo, Consuelo Mora, Blanca Ovalle y Aída Galindo porque tener paciencia y estar pendientes siempre será una gran ayuda.

A todas las personas que conforman la Maestría en Morfología Humana por todo su apoyo asistencial, los conocimientos impartidos y por ayudarme a ser mejor antropóloga al mostrarme el cuerpo humano desde una perspectiva integral. Y muy especialmente al profesor Luis Enrique Caro, por mostrar de una manera tan fácil lo que pareciera incomprendible y por aceptar dirigir esta idea.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo ser una ayuda académica para estudiantes de antropología biológica. Hace un recorrido por diferentes áreas de la biología del cráneo humano, mostrando cómo se relacionan su configuración celular, el desarrollo embrionario y su anatomía con los mecanismos de producción de fracturas.

Palabras clave: Antropología forense, biología del cráneo, análisis de trauma óseo

Abstract

The aim of this work is to be used as a text for biological anthropology students. It reviews how the structure, embryology and anatomy of the skull are closely related with the way in which the bones of the skull are fractured.

Keywords: Forensic anthropology, biology of the human skull, trauma analysis of bone

Contenido

	<u>Pág.</u>
Resumen	VII
Abstract	VII
Lista de dibujos	XI
Introducción	1
1. Ultra y microestructura: generalidades de las estructuras óseas	5
1.1 Células óseas	5
1.1.1 Células osteoprogenitoras	6
1.1.2 Osteoblastos	6
1.1.3 Osteocitos	7
1.1.4 Osteoclastos	8
1.2 Tejido óseo	9
1.3 Remodelado y regeneración	10
1.4 Comportamiento de células y tejidos en el cráneo	11
2. Desarrollo del cráneo	15
2.1 Origen y osificación.....	16
2.2 Formación del neurocráneo	17
2.2.1 Formación de la fosa anterior	19
2.2.2 Formación de la fosa media.....	20
2.2.3 Formación de la fosa posterior.....	20
2.3 Formación del esplacnocráneo.....	22
2.4 Formación de las fontanelas y suturas	26
3. Anatomía del esqueleto de la cabeza	29
3.1 Generalidades anatómicas del neurocráneo	30
3.1.1 Fosa anterior (Dibujo 3-3. A y B).....	33
3.1.2 Implicaciones para el análisis de trauma de la fosa anterior	34
3.1.3 Fosa media (Dibujos 3-4 y 3-5).....	35
3.1.4 Implicaciones para el análisis de trauma de la fosa media.....	36
3.1.5 Fosa posterior (Dibujo 3-6. A y B).....	37
3.1.6 Implicaciones para el análisis de trauma de la fosa posterior.....	39
3.2 Generalidades anatómicas del esplacnocráneo	40
4. Aproximación a la biomecánica y al análisis de fracturas en el cráneo	43
4.1 Nociones básicas de biomecánica.....	43
4.1.1 Fuerza (<i>Force</i>)	43

4.1.2	Carga (<i>Load</i>)	44
4.1.3	Energía (<i>Energy</i>)	44
4.1.4	Esfuerzo (<i>Stress</i>)	44
4.1.5	Deformación (<i>Strain</i>)	44
4.1.6	Compresión (<i>Compression</i>)	44
4.1.7	Tensión o tracción (<i>Tension o traction</i>)	44
4.1.8	Cizalla (<i>Shear</i>)	45
4.2	Propiedades biomecánicas de los huesos	45
4.3	Características biomecánicas del cráneo	46
4.4	Biomecánica de las fracturas	52
4.4.1	Recorridos frecuentes de fracturas	55
5.	Conclusiones y recomendaciones	59
5.1	Conclusiones	59
5.2	Recomendaciones	60
	Bibliografía	61

Lista de dibujos

	<u>Pág.</u>
Dibujo 1-1: Representación esquemática de un osteoclasto.....	8
Dibujo 2-1: Cartílagos que forman la base del cráneo.....	18
Dibujo 2-2: Fosas del cráneo.....	18
Dibujo 2-3: desarrollo del hueso frontal.....	19
Dibujo 2-4: Hueso occipital de un adulto.....	21
Dibujo 2-5: Representación de maxilares con paladar hendido.....	24
Dibujo 2-6: Vista anterior de región nasomaxilar con fisura palatina.....	25
Dibujo 3-1: Vista anterior (A) y lateral de neurocráneo y esplacnocráneo (B).....	31
Dibujo 3-2: Fosas de la base del cráneo.....	32
Dibujo 3-3: Vista superior (A) y medial de la fosa anterior (B).....	33
Dibujo 3-4: Vista superior de la fosa media.....	35
Dibujo 3-5: Vista posterior del hueso esfenoideas.....	36
Dibujo 3-6: Fosa posterior. (A) Vista superior. (B) vista medial.....	38
Dibujo 3-7: Esplacnocráneo.....	41
Dibujo 4-1: Deformaciones por tensión (B), compresión (C) y cizalla (D).....	45
Dibujo 4-2: Contrafuerte.....	48
Dibujo 4-2: Arbotante o arco flotante.....	49
Dibujo 4-2: Áreas de reforzamiento del cráneo, vista anterior (A), vista lateral (B).....	50
Dibujo 4-5: Deformación causada en un cráneo por un golpe en la región posterior.....	53

Lista de fotografías

	<u>Pág.</u>
Fotografía 4-1: Detalle cresta sagital y <i>crista galli</i> como contrafuertes.	48
Fotografía 4-2: Detalle de las regiones cigomaxilar y temporo-cigomática como contrafuertes y arbotantes	49
Fotografía 4-3: Vista posterior de los dos tercios inferiores del cráneo.	51
Fotografía 4-4: Vista inferior de la base del cráneo.....	51
Fotografía 4-5: Deformación causada al presionar un globo inflado.....	53
Fotografía 4-6: Vista externa de fractura concéntrica en una calota de cráneo,.....	53
Fotografía 4-7, Vista interna de fractura concéntrica y fracturas radiales en la misma calota de la imagen anterior.....	53
Fotografía 4-8: Fracturas causadas por la deformación del cráneo ante un impacto por mecanismo contundente.....	54
Fotografía 4-9: Fracturas causadas por la deformación del cráneo ante un impacto por proyectil de arma de fuego.	54
Fotografía 4-10: Fractura de forma circunferencial en la fosa posterior del cráneo causada por transmisión de energía, por golpe severo en la línea media mandibular.....	56

Introducción

El análisis antropológico forense de cadáveres tiene como objetivo aportar información a la autoridad judicial o a tribunales especiales de justicia, para ayudar a establecer la identidad de un cadáver y / o las circunstancias alrededor de su muerte, todo esto teniendo como base el estudio de las estructuras óseas.

De acuerdo con esto, el antropólogo forense debe tener conocimientos mínimos de auxología, osteología, anatomía, biología y biomecánica para hacer una interpretación adecuada de los hallazgos en el cadáver. Lastimosamente, los programas de formación en antropología en Colombia carecen de asignaturas obligatorias referentes a cualquiera de estas áreas, lo que hace que la práctica de la antropología forense dependa en buena medida del aprendizaje empírico y autodidacta de cada profesional en el que, en muchas ocasiones, termina conociéndose el hueso como una estructura independiente y aislada de los demás componentes del organismo, sin una comprensión holística que ayude a explicar el porqué de su variabilidad o de las diferentes respuestas ante eventos traumáticos a los que pueda estar expuesto.

El análisis de la cabeza y por tanto el cráneo, resultan fundamentales para aproximarse a la identidad y a la determinación de la causa y la manera de muerte de una persona, ya que son especialmente vulnerables a la ocurrencia de gran variedad de lesiones que ocurren en contextos que van desde accidentes, acciones suicidas, hasta violencia interpersonal (Galloway & Wedel, 2014) cuando la cabeza se convierte en objetivo de un atacante para lesionar o quitarle la vida a alguien.

En el campo de la antropología ha cobrado gran importancia el análisis de fracturas para la interpretación de las circunstancias de la muerte dentro de procesos de investigación judicial. Este interés empezó a manifestarse en la literatura del campo desde hace aproximadamente 30 años con el capítulo de Maples (1986) en la primera edición de

Forensic Osteology libro de Kathleen Reichs, que se enfocaba en la importancia de la osteología y la labor de los antropólogos dentro de las ciencias forenses.

Respecto al cráneo, los trabajos realizados por antropólogos incluyen principalmente el estudio de los patrones de fractura producidos por impacto de proyectil de arma de fuego (Smith, Berryman, & Lahren, 1987), (Fenton, Stefan, Wood, & Sauer, 2005), (Kroman, Kress, & Porta, 2011) y en algunos casos abordando la diferencia entre las lesiones por proyectil de arma de fuego y por mecanismo contundente, (Berryman & Symes, 1998), (Hart, 2005). Estos trabajos intentan describir los patrones de fragmentación del cráneo desde la biomecánica, para lo cual retoman los resultados de investigaciones realizados en la primera mitad del siglo XX que plantean varias explicaciones para el patrón recurrente en el recorrido de las fracturas (Vance, 1927) (LeCount & Hockzema, 1934) (Gurdjian, Webster, & Lissner, 1953) y (Dempster, 1967), partiendo de la idea de que las fracturas siempre tienden a comprometer las áreas más delgadas y a evitar las áreas más robustas del tejido óseo.

Berryman & Symes, (1998) manifiestan que la producción de fracturas debe analizarse teniendo en cuenta no solo los factores extrínsecos del evento en el cual ocurren (mecanismo causal, tipo de elemento, velocidad, trayectoria, entre otros), sino las características moleculares y celulares (ultra estructura), las propiedades de los tejidos de cada uno de los tipos de hueso (microestructura) y los accidentes anatómicos (macroestructura) las áreas afectadas por el trauma.

Por lo anterior, en este trabajo se hace una revisión de los aspectos biológicos del cráneo, con explicaciones en términos sencillos para que resulte accesible para estudiantes de antropología sin profundos conocimientos en las ciencias médicas, esperando que les sea útil en la interpretación de hallazgos durante el análisis antropológico. Como recurso didáctico, y esperando facilitar la comprensión del documento, el texto va acompañado de dibujos realizados por la autora y Oren Yogev.

El texto estará dividido en las descripciones de las generalidades de los huesos, las células que los componen, las características del tejido, el desarrollo de las estructuras del cráneo, su anatomía y finalmente se introducirán nociones básicas de biomecánica.

Antes de continuar, es necesario precisar que en este texto se entenderá por cráneo al esqueleto de la cabeza (Moore, Dalley, & Agur, 2010) o la cabeza ósea como se le conoce en la literatura médica¹. Este es un complejo conjunto de 22 estructuras que dan forma al rostro, protege el cerebro, los órganos de la vista, oído, olfato y el gusto; permite la masticación y es fundamental no solo para la vida, sino para la identidad de los individuos.

¹ En algunos textos se entiende por cráneo al componente óseo que protege el encéfalo, pero no es esta la manera en la que se usa el concepto en este documento.

1. Ultra y microestructura: generalidades de las estructuras óseas

Los huesos están compuestos por tejido conectivo altamente vascularizado, impregnado de matriz extracelular² con sales de calcio y fosfato (Pavelka & Roth, 2010). Sirven de soporte para el cuerpo, son los puntos en los que los músculos pueden hacer tracción para lograr el movimiento, protegen los órganos vitales, almacenan calcio, fósforo, magnesio y sodio (Salter, 2000), así como otras sustancias fundamentales para el funcionamiento del organismo y además son el lugar en el que se produce la sangre.

La capacidad que tienen los huesos para cumplir con sus funciones depende de su composición estructural, por lo que en adelante se muestran de manera general sus componentes principales.

1.1 Células óseas

La interacción constante entre las células de los huesos y la estrecha comunicación que tienen con el torrente sanguíneo, les permite recibir información de las glándulas paratiroides, los riñones y los intestinos, entre otros, convirtiendo a los huesos en parte fundamental en la regulación de los niveles de calcio y el fósforo y otras moléculas (Salter, 2000), que son indispensables para la comunicación celular en todo el organismo, incluyendo las células nerviosas. De esta manera cuando el cuerpo presenta, por ejemplo, bajos niveles de calcio, las células óseas reciben señales que las estimulan a liberarlo y ponerlo en el flujo sanguíneo para que llegue al lugar al que se requiere.

² Son componentes de un tejido, que se encuentran entre las células.

Las células óseas son de 4 tipos: células osteoprogenitoras, osteoblastos, osteocitos y osteoclastos y son las encargadas de cumplir las funciones del tejido óseo y de los elementos estructurales, los huesos. Los tres primeros tipos de células provienen de un mismo linaje: las células osteoprogenitoras. Los osteoclastos provienen de las células formadoras de la sangre.

1.1.1 Células osteoprogenitoras

Son células provenientes del mesénquima embrionario, con capacidad de proliferación y diferenciación, las cuales pueden dar lugar a condroblastos (células formadoras de cartílago) y osteoblastos. Se ubican en la capa más profunda del periostio (envoltura fibrosa del hueso) y en la capa que está en contacto con el hueso en el endostio (tejido que recubre la cavidad en la que se aloja la médula). Actúan durante el crecimiento de los individuos, en la madurez se encuentran inactivas, pero se reactivan para la reparación de fracturas.

1.1.2 Osteoblastos

Son células diferenciadas a partir de las osteoprogenitoras; de forma cuboide o cilíndrica, con un núcleo y un nucléolo de gran tamaño, abundante retículo endoplasmático rugoso, aparato de Golgi bien desarrollado y múltiples vesículas secretoras (Pavelka & Roth, 2010); las características de sus organelos les confieren la capacidad de producir abundantes sustancias que secretan y se convierten en la matriz que las rodea.

En un principio los osteoblastos secretan **osteoide**, que es la matriz orgánica no calcificada, compuesta principalmente por colágeno, Luego secretan sales de calcio y fósforo, calcificando la matriz orgánica, así como otras sustancias conocidas como proteoglicanos. Algunos de los osteoblastos se diferencian en osteocitos quedando encerrados en la matriz producida, otros entran en inactividad, y se ubican en la superficie externa e interna del hueso y se denominan células de revestimiento, similares a las osteoprogenitoras, con la diferencia de que no pueden dividirse, pero sí activarse cuando son requeridas.

1.1.3 Osteocitos

Los osteocitos son las células más abundantes en el hueso maduro, viven en promedio 25 años y no se dividen (Knothe Tate, Adamson, Tami, & Bauer , 2004). A pesar de que provienen de los osteoblastos, su morfología es de tipo dendrítica y no cuboide, es decir: su cuerpo tiene muchas ramificaciones que los mantienen unidos a los osteocitos vecinos, lo que permite una transferencia de información tan eficaz entre todas las células que hace que se comporten como una unidad (Knothe Tate, Adamson, Tami, & Bauer , 2004), que a su vez está comunicada con la red de vasos y nervios en todo el hueso.

Otra diferencia con los osteoblastos es que el retículo endoplasmático rugoso y aparato de Golgi están poco desarrollados (Knothe Tate, Adamson, Tami, & Bauer , 2004), lo que indica que han perdido buena parte de su capacidad secretora.

Los osteocitos tienen propiedades mecanosensoras (sensibles al movimiento), que se deben al espacio no calcificado que rodea a las ramificaciones de cada célula, el cual es un medio líquido que mantiene en contacto a los osteocitos con el periostio y el endostio, resultando ser la vía por la cual se mueven los nutrientes y desechos de los osteocitos. Este espacio líquido responde a las cargas mecánicas recibidas por el hueso, generando fricciones entre las proteínas que allí circulan, que estimulan a la célula a emitir diferentes tipos de señales dependiendo de las cargas a las que haya sido expuesta.

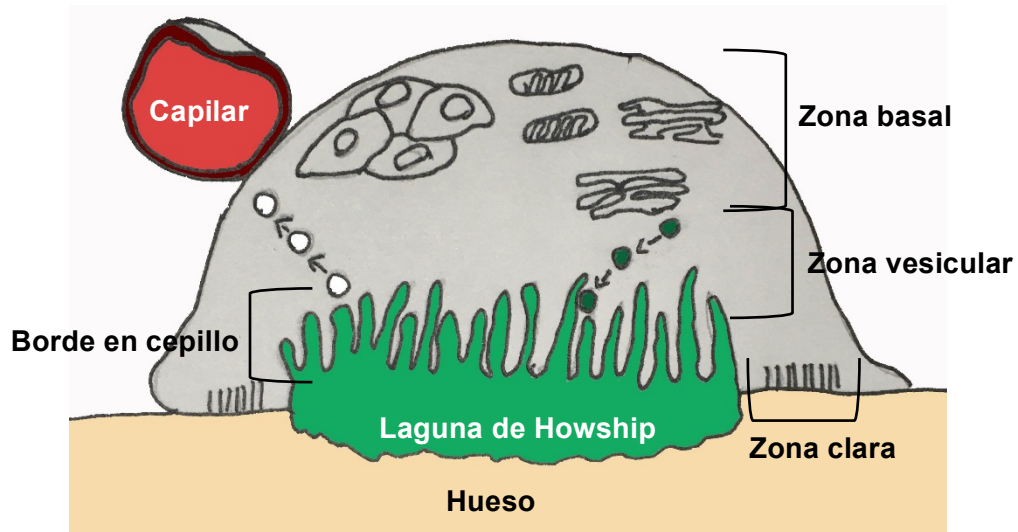
Como resultado de la compleja interacción de estímulos mecánicos y respuestas químicas, se encuentra que al aumentar la carga mecánica en los huesos, aumenta la expresión de señales sobre los osteoblastos (Noble, 2008) y, por el contrario durante la ausencia de cargas se producen sustancias como el sclerostin (Gorter, Krause, Löwik, van Bezooijen, & ten Dijke, 2008), que inhibe la actividad osteoblástica y favoreciendo la formación de osteoclastos. de esta manera se convierten en los “orquestadores” de la formación y remodelación ósea (Schaffler M. Cheung, Majeska, & Kenedy , 2014).

El osteocito también estimula la producción de osteoclastos con su muerte (aunque no se ha descubierto la manera exacta en la que se produce), se estima que genera un estímulo que induce a los osteocitos sanos a secretar sustancias que estimulan resorción del hueso por parte de los osteoclastos (Schaffler, Cheung, Majeska, & Kenedy , 2014).

1.1.4 Osteoclastos

Son células multinucleadas encargadas de la reabsorción del hueso. No provienen del mismo linaje de los osteoblastos y los osteocitos, sino de células formadoras de la sangre (**hematopoyéticas**) y se crean ante el estímulo de los osteoblastos y osteocitos, que inducen a la mitosis y a la unión de varios monocitos (un tipo de glóbulos blancos) en una sola célula de hasta 50 núcleos, con al menos 4 zonas claramente diferenciadas (Dibujo N° 1-1):

Dibujo 5-1: Representación esquemática de un osteoclasto.



- Zona Basal: es la parte más alejada de la laguna de Howship³, en donde se encuentra la mayor parte de los organelos.
- Borde en cepillo: es el área que participa activamente en la resorción del tejido, con prolongaciones digitiformes que dan el nombre a la zona.
- Zona clara: es la que rodea al cepillo, compuesta por filamentos que ayudan a la membrana a estar en contacto con el hueso.
- Zona vesicular: es el área entre la zona basal y el borde del cepillo en la que se encuentran múltiples vesículas, que transportan tanto las sustancias que ayudan a

³ Depresión en la superficie del hueso, en la que se encuentran los osteoclastos, generada por la degradación del hueso a consecuencia de las sustancias ácidas producidas por estas células.

disolver el hueso, como las moléculas disueltas que van a salir luego al torrente sanguíneo, por el lado opuesto al borde en cepillo.

1.2 Tejido óseo

Cada hueso está formado aproximadamente por un 65% de materia inorgánica (Fernández-Tresguerres Hernández-Gil, Alobera Gracia, del Canto Pingarrón, & Blanco Jerez, 2006), que le confiere rigidez, esta materia está compuesta principalmente por agua y cristales de hidroxapatita que contienen calcio y fósforo. El 35 % restante es material orgánico, compuesto en más del 90% por colágeno (Currey, 2002), que proporciona elasticidad.

Microscópicamente el tejido óseo puede clasificarse de acuerdo con la organización espacial de las fibras de colágeno (Marotti, 1990) en:

- Tejido fibroso o inmaduro: cuando las fibras de colágeno están dispuestas de manera desorganizada. Es el primer tipo de tejido en aparecer en cada uno de los huesos, lo hace en el periodo intrauterino y sólo se observa en individuos infantiles o en adultos, en condiciones patológicas (Salter, 2000). Se forma bastante rápido pero es poco mineralizado, por lo cual es más elástico y menos rígido.
- Tejido laminar, lamellar o maduro: aparece en reemplazo del tejido fibroso, su principal característica es que las fibras de colágeno están alineadas en capas.

Macroscópicamente, el tejido maduro de los huesos se divide en:

- Hueso compacto o cortical: es el tejido en el que macroscópicamente no se ven espacios, formado por conductos de Havers u osteones, que son láminas de tejido óseo distribuidas de manera concéntrica, formando una especie de túbulos que contienen un paquete vasculo nervioso que se comunica con cada una de las células. La dirección de los osteones varía de acuerdo con la forma del hueso, por ejemplo, en los huesos largos esos conductos están dispuestos principalmente de manera longitudinal. El tejido cortical se ubica en la superficie externa de todos los huesos y es mucho más grueso en las diáfisis de los huesos largos, en donde se encuentra alrededor de la cavidad medular.
- Hueso esponjoso o trabecular: es el tejido que se encuentra más profundo que el tejido compacto y es la porción mayoritaria en las epífisis de los huesos largos, en los

huesos cortos y se encuentra también, en las cavidades medulares de las diáfisis de los huesos largos. Este tejido forma espacios entre las trabéculas óseas como celdas en las que se encuentran las células hematopoiéticas y los reservorios de grasa en los huesos largos. Su composición también es de tejido laminar, pero no forma sistemas de Havers. Está dispuesto en el sentido de la aplicación de carga en el hueso, es decir, forma una estructura que además sirve para dar resistencia al hueso ante la compresión.

1.3 Remodelado y regeneración

El **remodelado** es el mecanismo por el cual el hueso viejo es reemplazado mediante la acción coordinada de producción y reabsorción ósea por parte de los osteoblastos y osteoclastos, respectivamente; estas células actúan en una unidad que es conocida por sus siglas en inglés como BMU (*basic multicelular unit*) (Stout & Crowder, 2012), lo que en español se traduce como: una unidad multicelular básica que actúa en tres fases: **activación** de las células, **reabsorción** y **formación** de nuevo hueso.

El remodelado se da durante toda la vida, se le llama positivo cuando hay más formación que reabsorción y negativo cuando es al contrario (Salter, 2000). Hasta los 30 años, en promedio, hay un balance positivo y a partir de ahí empieza a ser negativo (Fernández-Tresguerres Hernández-Gil, Alobera Cracia, del Canto Pingarrón, & Blanco Jerez, 2006).

Durante el remodelado se renueva del 5 al 15 % del hueso total al año en condiciones normales (Fernández-Tresguerres Hernández-Gil, Alobera Gracia, del Canto Pingarrón, & Blanco Jerez, 2006), el 5% de la cortical y el 20% del trabeculado al año (Fernández-Tresguerres Hernández-Gil, Alobera Cracia, del Canto Pingarrón, & Blanco Jerez, 2006).

Se consideran factores estimuladores del remodelado:

- Genéticos: Fernández-Tresguerres Hernández-Gil y colaboradores (2006) señalan que el 60 al 80% del remodelado depende de factores heredados y que, por ejemplo, los individuos de ascendencia africana tienen más remodelación que los de los demás grupos poblacionales.

- **Mecánicos:** Las cargas que recibe el cuerpo estimulan el remodelado que adapta al hueso a las cargas a las cuales es sometido generando áreas de reforzamiento en zonas que tienen mayor actividad mecánica.

El remodelado es el responsable del balance entre el tejido compacto y esponjoso en cada uno de los huesos – en diferentes proporciones dependiendo de la estructura ósea – y hace que el esqueleto sea liviano, pero a la vez resistente a grandes cargas. Cuando alguna de las células óseas emite señales que favorece la formación de osteoclastos u osteoblastos se generan patologías como la osteoporosis que es la pérdida de densidad en el hueso o la enfermedad de Van Bouchen (Gorter, Krause, Löwik, van Bezooijen, & ten Dijke, 2008), que es una condición en la que la densidad ósea es elevada, sin tejido trabecular, en algunos casos la persona que la posee sufre del bloqueo de los nervios y hasta del encéfalo por parte de los huesos que lo recubren.

Por otro lado, la **regeneración** ósea se da cuando hay fractura y se produce una respuesta inflamatoria y hematoma formado por la sangre de los vasos rotos, que libera señales que inducen a la formación de osteoclastos y a la posterior formación de tejido vascularizado para reemplazar al coágulo y por el cual llegarán las sustancias necesarias para la formación del nuevo hueso.

Las fracturas usualmente ocurren cuando hay trauma, pero puede ocurrir también por **fatiga**. La fatiga es el fallo que ocurre cuando el hueso ha sido expuesto a varios ciclos de carga, que aunque no superan el umbral de fractura del hueso, sí acumulan microtrauma, el cual produce la fractura con bajas cargas cuando el defecto acumulado llega a cierto punto (Mulargia, Dooley, Cristofolini, & Taylor, 2014), en estos casos cuando ocurre una fractura, normalmente lo hace ante cargas de energía bajas, en algunos contextos se le conoce a este tipo de fracturas como **fracturas por estrés**.

1.4 Comportamiento de células y tejidos en el cráneo

Es muy poca la bibliografía disponible sobre la ultra y microestructura del cráneo, específicamente. Aun así, respecto a la mecanosensibilidad de las células del cráneo se piensa que puede llegar a ser diferente a la del resto del cuerpo debido a que algunos segmentos de éste no reciben cargas asociadas al peso o a una fuerte acción muscular,

pero no ha podido ser probado en estudios *in vitro* (Klein-Nulend, Bacabac, & Bakker, 2012).

Por lo anterior es difícil que las fracturas del cráneo se remodelen completamente o generen un callo (cicatriz) óseo abultado, lo que puede dificultar la estimación del tiempo en el que ocurrió la fractura, pues al no existir un estímulo mecánico constante, su proceso de reparación es más lento.

En el esqueleto facial hay gran influencia de cargas mecánicas, debido a los procesos de masticación y a la presencia de los dientes, por lo que la región orofacial presenta un remodelado constante, que le permite a los odontólogos realizar prácticas de ortodoncia al ejercer cambios en las fuerzas de tensión y compresión de los dientes. También es por esto que al perder los dientes la fisionomía del rostro de una persona cambia, especialmente si se pierden caninos superiores, cuya ausencia generará la depresión de la arcada dental en la región nasogeniana o la pérdida de molares que obliga a desplazar la mandíbula hacia anterior para lograr una mejor mordida de los alimentos, generando una ampliación en el ángulo de la rama mandibular.

La dirección y el grosor del tejido del cráneo adulto depende de la topografía anatómica, ya que cada forma tiene una distribución del tejido diferente. Dempster (1967) menciona que existen 8 diferentes maneras en la que el grano del tejido cortical está distribuido en el cráneo y cada una se asocia a una morfología particular:

- Corteza de la calota: muestra un patrón disperso, con líneas aleatorias, este patrón se observa en la superficie interna y externa.
- Superficies planas; presentan grano paralelo.
- Crestas: presentan tejido paralelo al eje convexo de la elevación.
- Canales: tienen el grano en sentido transversal, y en sus bordes se observa el tejido característico de las crestas.
- Concavidades: tienen el grano alineado a manera de círculos concéntricos..
- Bordes libres: como rebordes y perímetro de los orificios, tienen el grano paralelo al borde.
- Espinas y procesos agudos: el grano es longitudinal a la forma de la espina y converge en la punta.

- Formas misceláneas: son una combinación de las formas de los tejidos arriba descritas, normalmente se encuentran alrededor de agujeros y surcos muy angostos.

Estudios como los de (Boruah, y otros, 2015) muestran que es significativamente más gruesa la capa externa de tejido cortical, que la interna en las estructuras que conforman la calota y que aunque sí hay diferencia en el grosor de los huesos de un mismo individuo, no existe un patrón reconocible y que esa diferencia no es significativa entre individuos.

La edad es otro factor que influye directamente las propiedades de los tejidos óseos, incluido el cráneo pues en individuos lactantes el hueso es inmaduro, más elástico, muy delgado y de una textura porosa. En individuos adultos jóvenes es un hueso con mayor resistencia y en individuos ancianos es un hueso mucho más frágil debido a los procesos de remodelación negativa, por lo que el análisis de trauma óseo debe realizarse teniendo en cuenta las características propias de cada edad, pues por ejemplo: una cantidad de energía X aplicada mediante el uso de un elemento Y afectará de manera muy diferente a un individuo lactante, a un adulto joven o a un anciano.

El campo de la biomecánica y otras áreas afines, queda a la espera de estudios que ayuden a explicar suficientemente las diferencias de grosor en las estructuras del cráneo y la relación de éstas con la producción y el recorrido de las fracturas.

2.Desarrollo del cráneo

Para iniciar el abordaje del desarrollo del cráneo es necesario tener en cuenta las siguientes generalidades, que permitirán una mejor comprensión de los procesos involucrados.

- El cráneo está compuesto por dos segmentos anatómicos fácilmente diferenciables: el esplanocráneo o viscerocráneo y el neurocráneo. El primero incluye desde el borde inferior de las órbitas hasta la mandíbula, contiene y protege los órganos de la visión, el olfato y el gusto; el neurocráneo, comprende desde el hueso frontal hacia posterior protege el encéfalo, y puede dividirse en base y bóveda craneal.
- Las estructuras óseas inician su aparición luego de que se han desarrollado vasos, nervios y órganos. Crecen estimulados por las señales que reciben de las células de los tejidos vecinos, por lo tanto si no hay un crecimiento adecuado de un órgano asociado tampoco lo habrá del hueso (Di Leva, y otros, 2014).
- Cada uno de los segmentos del cráneo crece de manera independiente, es decir, el crecimiento del cráneo es alométrico. Esto se debe a que cada parte recibe diferentes estímulos para su desarrollo, el esplanocráneo recibe los estímulos de los órganos del rostro, mientras que el neurocráneo recibe estímulos internos por parte del encéfalo y externos que provienen de los músculos del cuello y la masticación. En el neurocráneo, además, la base se desarrolla de forma más lenta que la bóveda debido a que su osificación es endocondral.
- Durante la etapa fetal el neurocráneo crece de manera más acelerada, para responder al desarrollo del encéfalo, en tanto que el esplanocráneo crece a una tasa muy lenta. Luego del nacimiento el esplanocráneo empieza a recibir estímulos de los órganos de la respiración y la deglución, de los movimientos masticatorios y del crecimiento de los dientes, lo que contribuye a la aceleración de su crecimiento.

2.1 Origen y osificación

Los huesos del cráneo se forman a partir de **células mesenquimatosas**, que hacen parte del tejido conectivo embrionario, que posee potencial para dar origen a diferentes tipos de tejidos. El mesénquima del que proviene el cráneo tiene dos orígenes, uno es el **mesodermo paraxial**, somita que se ubica a lado y lado del tubo neural y el otro es la **cresta neural**. En esto difiere del resto de las estructuras del esqueleto, que sólo provienen del mesodermo lateral (Sadler, Esqueleto Axial, 2012).

La **cresta neural** es un conjunto de células del ectodermo (el componente más externo de las capas germinativas embrionarias), que se encuentra a lado y lado del tubo neural. Sus células migran hacia diferentes áreas, formando el esqueleto facial, las neuronas periféricas sensitivas, entre otras muchas estructuras. Al igual que el mesodermo, la cresta neural produce células mesenquimatosas que contribuirán con la formación de los huesos de la cara y la parte anterior de la base del cráneo, en tanto que el mesodermo paraxial será el responsable de la parte posterior de la base y la bóveda.

A partir del mesénquima, las estructuras del cráneo se convierten en hueso mediante osificación **intramembranosa** y **endocondral**. El tipo de osificación depende de la función de los huesos: las áreas que requieren un desarrollo más rápido tienen osificación **intramembranosa**, que genera el hueso directamente desde el tejido mesenquimatoso, sin pasar por una fase cartilaginosa, en cambio la osificación **endocondral** se da más lentamente debido a que el mesénquima deriva primero en cartílago y luego en hueso. Una vez formado cada hueso, el aumento de tamaño se da por aposición de tejido óseo en la superficie externa y reabsorción del mismo en la superficie interna, independientemente del tipo de osificación inicial.

Los formación intramembranosa se da en forma de espículas que parecen agujas dispuestas de manera radial, y resultan notorias en los esqueletos de individuos lactantes (Sadler, Cabeza y cuello, 2012), lo cual es muy relevante para el análisis antropológico del trauma óseo, ya que las fracturas tienden a seguir la dirección del tejido. (Love, Derrick, & Wieserma, 2011) y es más probable que estos se fracturen siguiendo la dirección de estas espículas.

Se forman por osificación intramembranosa: el frontal, los nasales, lacrimales, cigomáticos, maxilares, mandíbula, los cuales provienen de la cresta neural; los parietales, la parte posterior de los temporales y la parte superior del occipital, que provienen del mesodermo paraxial (Sadler, Cabeza y cuello, 2012), los huesos restantes se forman por osificación endocondral.

2.2 Formación del neurocráneo

Evolutivamente, el neurocráneo tiene dos orígenes: uno dérmico (la bóveda), que recuerda los exosqueletos ancestrales (Scheuer, Black , & Christie, 2000) y otro cartilaginoso (la base), que se conoce como condrocráneo. Hoy en día el neurocráneo conserva las características dérmica y endocondral representadas en la osificación intramembranosa y endocondral, respectivamente.

El condrocráneo de los vertebrados y de los humanos, por supuesto, es una placa basal de tres pares de cartílagos que se fusionan en la línea media (de cefálico a caudal son: trabeculares, hipofisarios y paracordales) a los que están unidos 3 pares de cápsulas que protegen los órganos del oído, vista y olfato (Scheuer, Black , & Christie, 2000) de cefálico a caudal las cápsulas son: las alas esfenoidales, alas temporales y cápsula ótica (Dibujo 2-1, A y B). Estas placas de cartílago tienen una particularidad: el aumento de su tamaño se da en dos direcciones y no en una como ocurre en las placas de crecimiento de los demás huesos del cuerpo.

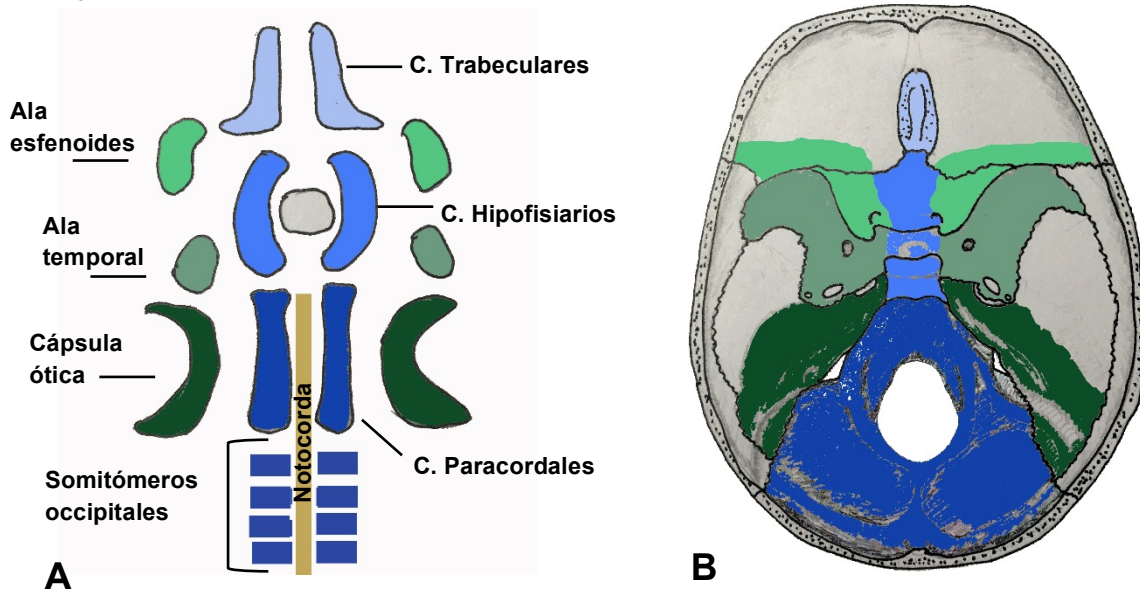
La porción intracraneal de la base puede dividirse en fosas anterior, media y posterior, que deben entenderse como 3 unidades independientes (Di Leva, et al., 2014) (Dibujo 2-2), pues cada una se desarrolla a partir de fuerzas locales. Se piensa que el desarrollo de la región intracraneal de la base y la bóveda puede estar influenciado por las tensiones que generan el falx cerebro y el tentorium⁴ durante el crecimiento (Di Leva, et al., 2014).

En general, el crecimiento de la base está estimulado por el sistema fonatorio y la postura de la cabeza con respecto al esqueleto (Di Leva, et al., 2014), por lo que el

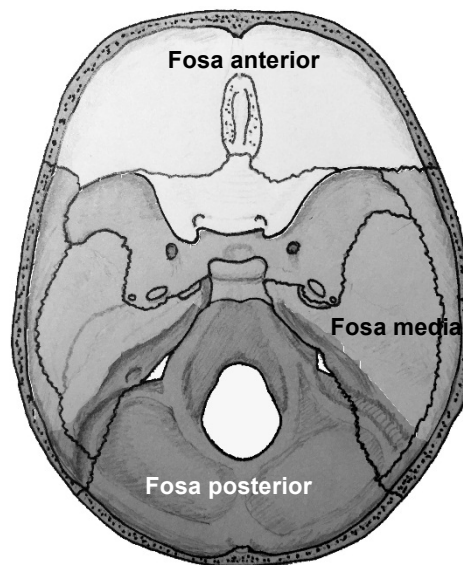
⁴ Repliegues de la membrana externa que envuelve el encéfalo, generando la división de ambos hemisferios del cerebro (*falx cerebri*) y separando el cerebelo de éste (*tentorium*).

estudio de su anatomía resulta indispensable para la comprensión de los cambios en los diferentes linajes de los homínidos.

Dibujo 2-1: Cartílagos que forman la base del cráneo. (A) Representación de los cartílagos antes de la fusión, los de color azul muestran los que se unirán en la línea media y los de color verde, muestran las cápsulas laterales. (B) Representación de la base de cráneo de un adulto. El área coloreada señala qué estructuras tienen osificación endocondral y cada color representa el cartílago del cual proviene, teniendo en cuenta el dibujo anterior.



Dibujo 2-2: Fosas del cráneo.

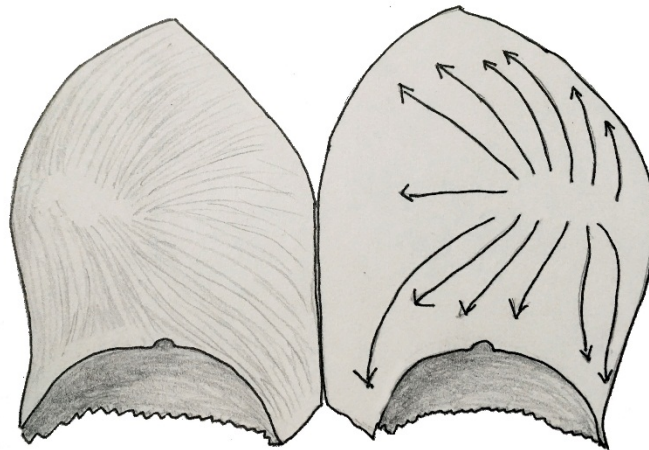


2.2.1 Formación de la fosa anterior

En la fase temprana del desarrollo aparecen por osificación intramembranosa tres estructuras que van a conformar el borde superior de la órbita: el frontal, el cartílago esenoetmoidal y el ala orbital (Captier, Cristol, Montoya, Prudhomme, & Godlewski, 2003).

La osificación del frontal inicia en las eminencias (Captier, Cristol, Montoya, Prudhomme, & Godlewski, 2003). El frontal surge de dos huesos que forman la mayor parte de la fosa y se osifica a partir del mesénquima del área, al que se le denomina merencefálico y avanza hacia la parte superior y hacia la base para formar la parte vertical y orbital (Dibujo 2-3).

Dibujo 2-3: desarrollo del hueso frontal. Nótese la dirección del crecimiento.



La lámina cribosa del etmoides, que se encuentra en la línea media de la fosa anterior, se forma por osificación endocondral y es por donde pasan desde la cavidad nasal las fibras nerviosas. En el centro de la lámina está la *crista galli*, que es el ancla en la que se fija el *falx cerebri* u hoz del cerebro.

El desarrollo de fosa anterior está estrechamente relacionado con el crecimiento de la órbita, las estructuras faciales superiores y por supuesto: el encéfalo (Di Leva, y otros, 2014).

2.2.2 Formación de la fosa media

La fosa media está compuesta por el cuerpo y las alas mayores del esfenoides, los temporales y la parte inferior de los parietales. Los orificios de esta fosa comunican con el viscerocráneo, por donde pasan el nervio óptico, el nervio maxilar, la rama meníngea del nervio mandibular y la arteria meníngea media; esta última genera surcos en la fosa que se forman con el constante pulsar de la arteria. El desarrollo de la fosa media depende del crecimiento mandibular y su biomecánica (Di Leva, et al., 2014)

En la parte posterior, los cartílagos paracordales alrededor del fin de la notocorda, son los primeros en formarse y dan lugar al cuerpo del esfenoides. El esfenoides es una estructura mixta, que tiene origen cartilaginosa del cuerpo y las alas menores y origen intramembranoso de las alas mayores.

2.2.3 Formación de la fosa posterior

La integración parieto-occipital y las dinámicas cerebro-cerebelares influyen directamente la formación de la fosa posterior (Di Leva, et al., 2014).

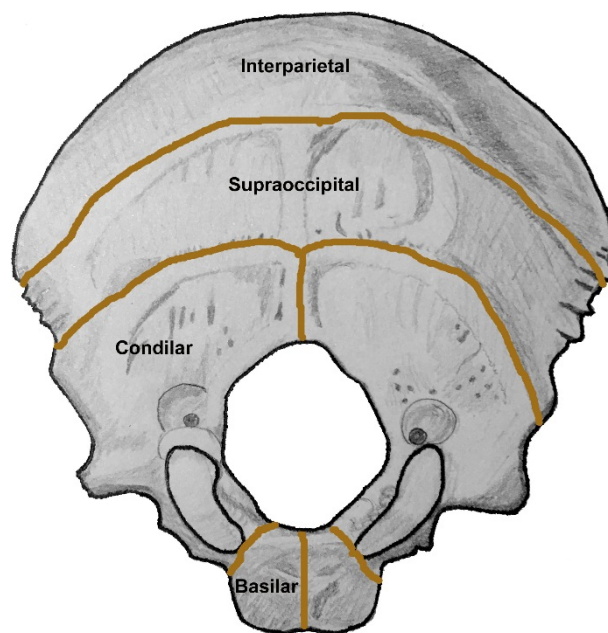
El desarrollo del occipital inicia en la novena semana de gestación con dos centros de osificación: un centro primario ubicado en la región ventral, cercano a la notocorda y otro en el segmento interparietal (Shapiro & Robinson, 1976). La porción basilar deriva de 5 cartílagos (Dibujo 2-4): dos que conforman la base (basilares), dos que corresponden a cada uno de los cóndilos (condilares) y uno que da origen al segmento supraoccipital (ubicado posterior al agujero magno), la parte más superior se ubica en medio de los parietales, por eso se le denomina interparietal y es de origen intramembranoso (Scheuer, Black, & Christie, 2000).

En la semana 12 se fusionan los segmentos interparietal y supraoccipital, se unen en la línea media, pero permanecen separados en los segmentos laterales. En la semana 14 (Shapiro & Robinson, 1976), los dos segmentos se unen un poco más y la separación lateral es menor. Para el momento del nacimiento, todavía es notoria esta unión (Scheuer, Black, & Christie, 2000), se le conoce como sutura mendosa y es visible hasta, aproximadamente, dos años después del nacimiento, por lo que debe prestarse especial cuidado al analizar cadáveres perinatales, para no confundir esta sutura con una

fisura o una fractura.

Para el antropólogo es importante recordar que el crecimiento del segmento interparietal y el supraoccipital inicia desde el centro, es por esto que no tienen sutura, por eso si se observa una imagen radiolúcida o se observa una separación en esta área durante el análisis, debe sospecharse de que se trate de una fractura (Shapiro & Robinson, 1976).

Dibujo 2-4: Hueso occipital de un adulto. En este se resaltan los diferentes segmentos que lo conforman durante el desarrollo.



Hacia la semana 36 de gestación, las porciones basioccipitales y laterales están separadas por una sincondrosis y su unión se da entre los 2 y 4 años después del nacimiento y se unen también a la parte supraoccipital en el mismo periodo. La unión del occipital con el esfenoides se inicia de 12 a 13 años en las niñas y de 14 a 15 años en los niños y termina entre los 16 y los 20 años (Shapiro & Robinson, 1976). Lo anterior resalta también la importancia diagnóstica que tiene el occipital para el antropólogo para la estimación de edad de individuos subadultos.

Debido al origen endocondral de la base, la acondroplasia, que es una patología que inhibe el crecimiento adecuado de los componentes cartilagosos del cuerpo, genera alteraciones en la forma del cráneo, ya que la base tiene un tamaño reducido en relación

con la bóveda y los demás componentes del cráneo (Szabo-Rogers, Smithers, Yakob, & Liu, 2010).

La bóveda craneal aparece al fin del primer mes de desarrollo como placas curvas del mesénquima que se esparcen hacia abajo y se encuentran con las estructuras de la base.

2.3 Formación del esplacnocráneo

Para algunos investigadores fue la aparición de la cresta neural la que permitió el desarrollo de una "Nueva Cabeza" (Chai & Robert, 2006), (Di Leva, et al., 2014), (Scheuer, Black, & Christie, 2000), con un elaborado complejo maxilar que cambió la forma de la alimentación los animales al permitirles masticar, en tanto que animales más primitivos ingieren su alimento haciendo uso de músculos de succión. Sus afirmaciones se basan en que quienes presentan esta "nueva cabeza" involucran células de la cresta neural en el desarrollo de las estructuras del rostro y que los que no la tienen no presentan cresta neural. Por lo anterior, no se puede hablar del desarrollo del esplacnocráneo sin referirse a la cresta, que para algunos es considerado el cuarto tejido embrionario.

Durante el tercer mes de desarrollo intrauterino, el rostro adquiere características humanas. Al comienzo, las órbitas, que contienen los ojos y sus anexos, están dispuestas lateralmente, así que inician su acercamiento hacia la línea media, se desacelera el crecimiento del neurocráneo en comparación con el resto del cuerpo, pues al inicio del tercer mes la cabeza es aproximadamente la mitad del embrión, cuando alcanza la mayor proporción con respecto al tamaño total, y luego empieza a perder esa relación en el tamaño ya que en los huesos del rostro empiezan a formarse los senos y los dientes. La órbita por su parte aumenta en su altura, pero no su anchura (Haas, Weiglein, Faschinger, & Müllner, 1993).

La cara inicia su formación al final de la cuarta semana de gestación, a partir de la cresta neural que se organiza en arcos faríngeos (sólo los dos primeros están relacionados con la formación del cráneo), el primero de ellos, durante la sexta semana, da origen a 4 protuberancias alrededor del estomodeo (cavidad bucal primitiva) (Scheuer, Black &

Christie, 2000). A estas protuberancias se les conoce como: prominencias maxilares superiores (dos) prominencias maxilares inferiores (dos), hay una quinta prominencia, la prominencia frontonasal, que no tiene origen en el primer arco faríngeo, pero sí tiene origen en la cresta neural. Del segundo arco no derivan estructuras de óseas de la cara, ya que sólo da origen al estribo, a las astas menores del hioides y a las estiloides de los temporales. (Sadler, Cabeza y cuello, 2012)

Para la semana 13 del desarrollo intrauterino los elementos del ojo ya se han establecido y han iniciado sus efectos inductivos sobre el desarrollo de la órbita, a partir de este momento la órbita inicia un crecimiento homogéneo. El primer hueso en iniciar la osificación alrededor de la órbita es el maxilar, que lo hace en la sexta semana y lo siguen los demás que inician su osificación alrededor de la semana 16 (Haas, Weiglein, Faschinger, & Müllner, 1993). La forma definitiva de la órbita no sólo está determinada por los estímulos que recibe de los tejidos de los ojos, sino también a las mecánicas del desarrollo del neurocráneo y el resto del esqueleto facial.

Después de la sexta semana, se desarrollan dos prominencias más, llamadas prominencias nasales (laterales y mediales) alrededor de las placodas nasales⁵. El aspecto final de la nariz lo da la protuberancia frontonasal que creará el puente; las prominencias nasales, que formarán la cresta, la punta y las alas. Adicionalmente, de las prominencias nasales mediales surgirá el segmento intermaxilar.

La formación del paladar se lleva a cabo por dos componentes: uno es anterior, el paladar primario, que se origina del segmento intermaxilar, y que corresponde a la parte más anterior de los huesos maxilares; el otro componente es el paladar secundario, formado por derivados del arco faríngeo y que corresponde a los huesos maxilares. El límite entre los dos componentes es el agujero incisivo.

La palatogénesis secundaria está estimulada específicamente por los movimientos de la lengua (Szabo-Rogers, Smithers, Yakob, & Liu, 2010). La fusión del paladar en la línea media ocurre a las 7 semanas en los embriones masculinos, y a las nueve en los femeninos y separa por completo las cavidades a las 42 semanas, se forma de la fusión de las crestas de las protuberancias maxilares.

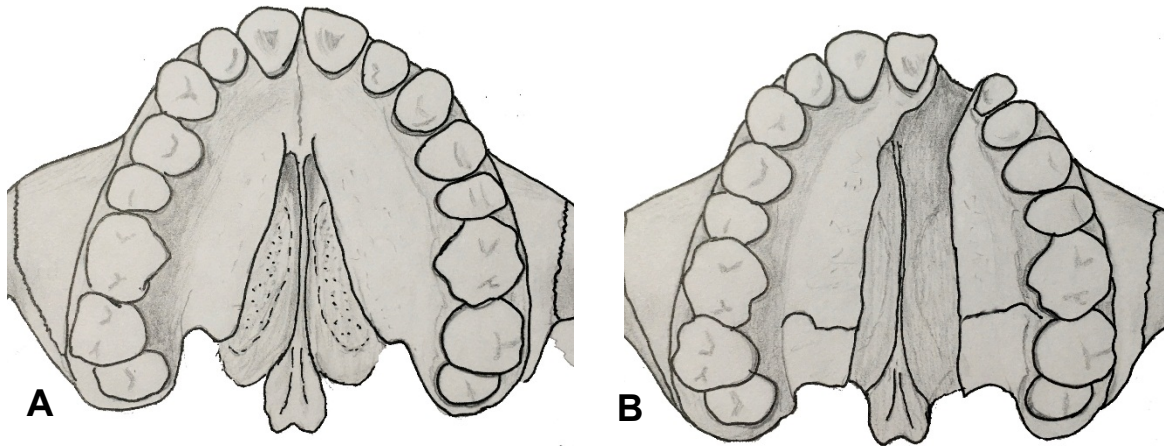
⁵ Engrosamientos de tejido ectodérmico, que darán origen al órgano olfatorio.

De lo anterior se deriva que las alteraciones en la formación del paladar anterior estén relacionadas con la unión de las prominencias nasales, que son las responsables de la formación del segmento intermaxilar, el surco nasolabial, los cuatro incisivos superiores y el paladar primario. Las alteraciones pueden ir desde el cambio de coloración del labio hasta fisuras en la nariz, la arcada dental y pueden llegar hasta el agujero incisivo (Sadler, Cabeza y cuello, 2012). En cambio La fisura palatina posterior y la fisura de la úvula son causadas por la falta de fusión de las crestas palatinas y pueden comprometer sólo la úvula o el paladar secundario.

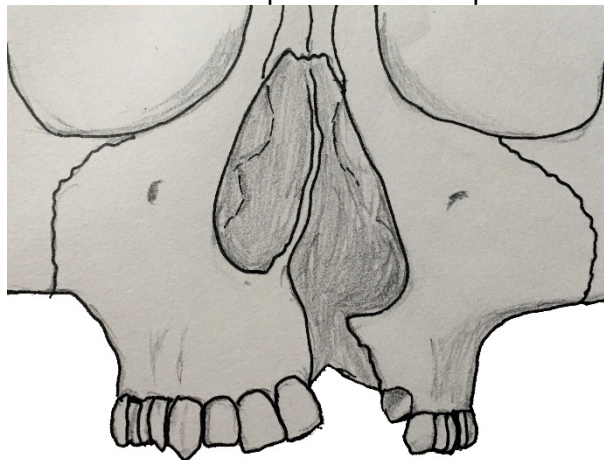
En términos prácticos, desde la antropología deben tenerse presente estos dos orígenes, ya que determinarán la ubicación del paladar hendido: una más posterior (Dibujo 2-5, A), que puede no tener manifestación clínica --la cual no tiene porqué relacionarse con fisura en el labio--, es decir que puede no resultar notoria para la persona que la tiene, pues aunque exista la fisura, ésta puede estar recubierta por tejido blando. Mientras que las fisuras en el paladar anterior y en la arcada dental (Dibujo 2-5, B), sí pueden estar asociadas a malformaciones de los tejidos blandos, especialmente la nariz y el labio; en este caso se manifiesta en el hueso con una desalineación del borde nasal inferior (Dibujo 2-6).

El antropólogo debe ser cuidadoso al otorgar valores identificatorios a las fisuras palatinas observadas al momento del diagnóstico y siempre debe plantear como hipótesis el posible compromiso de los tejidos blandos pues un mal diagnóstico puede afectar negativamente la comparación de los datos obtenidos de un cadáver con los que se encuentran en las bases de datos de personas desaparecidas.

Dibujo 2-5: Representación de maxilares con paladar hendido. (A) Vista inferior de maxilar con fisura del paladar secundario. Nótese que la fisura inicia posterior al agujero incisivo. (Izquierda). (B) Vista inferior de maxilar con fisura de la arcada dental y del paladar primario y secundario.



Dibujo 2-6: Vista anterior de región nasomaxilar con fisura palatina. Nótese que el ala nasal derecha se encuentra más inferior que la del lado opuesto.



En la sexta semana de desarrollo se forman las láminas dentales de las prominencias maxilares, estas láminas van a formar los dientes, los cuales empiezan a erupcionar alrededor de los seis meses de vida. Los dientes se forman desde la punta, hacia el cuello y luego la raíz. Es por esto, que el desarrollo de los cierres de los ápices de las raíces es un rasgo utilizado por la antropología y la odontología para la estimación de edad de un individuo menor de 21 años, momento en el que los terceros molares (últimos en formarse) terminan la formación del ápice de la raíz.

Los huesos del oído son los primeros huesos del cuerpo en terminar su crecimiento y en osificarse por completo, en el cuarto mes de vida intrauterina (Sadler, Cabeza y cuello,

2012) aunque no hacen parte del esqueleto facial, provienen de los arcos faríngeos. Del primer arco se forman el yunque y el martillo y del segundo se forma el estribo.

2.4 Formación de las fontanelas y suturas

Las suturas y las fontanelas tienen un desarrollo independiente y tienen como función permitir la flexibilidad de la bóveda durante el proceso del parto y permitir el rápido crecimiento del encéfalo. Donde hay más de dos huesos las suturas se ensanchan y se llaman fontanelas.

Existen 6 fontanelas en el cráneo de un neonato, aunque sólo las dos superiores pueden palparse: la fontanela anterior o bregmática que une el hueso frontal con los parietales y se cierra alrededor de los 18 meses de nacimiento; la fontanela posterior o lambdaidea, que une los huesos parietales y el occipital y se cierra alrededor de los dos meses. Las dos fontanelas restantes no se encuentran sobre la línea media por lo que hay dos de cada una: las fontanelas ptéricas o anterolaterales que separan a los huesos frontal, esfenoides, temporal y parietal y las fontanelas astéricas o posterolaterales que se encuentran entre el temporal, parietal y el occipital. También hay una fontanela temporal que separa el hueso frontal en su parte inferior, del hueso nasal.

Las suturas son regiones indiferenciadas de mesénquima, la sutura interfrontal y la coronal contienen mesénquima derivado de la crestaneural. (Szabo-Rogers, Smithers, Yakob, & Liu, 2010). Este mesénquima crece y va dando poco a poco lugar para que el cráneo se desarrolle adecuadamente, cuando hay alteraciones que afectan el crecimiento de las suturas y se cierran prematuramente, hay malformaciones en el cráneo.

En las suturas las fibras de colágeno que forman las cápsulas están en contacto directo con la duramadre y el periostio externo, es por esto que su desarrollo está determinado por las tensiones que genera el encéfalo durante su crecimiento (Captier, Cristol, Montoya, Prudhomme, & Godlewski, 2003).

La sutura esfenofrontal es particular porque es una unión condromembranosa, que une el frontal que tiene origen intramembranoso y las alas menores del esfenoides que son de origen endocondral.

Para finalizar: cabe mencionar algunas de las patologías asociadas al proceso de formación del cráneo: la craneosquisis o acrania, la cráneo sinostosis, cuando se cierra antes de tiempo alguna de las suturas, que genera deformaciones por ejemplo: si la primera sutura en cerrarse es sagital, el cráneo va a quedar dolicocefalo y si es la coronal, queda braquicefalo; también está la plagio cefalia, cuando se cierra la sutura coronal de un solo lado (Sadler, Cabeza y cuello, 2012), entre otras.

3. Anatomía del esqueleto de la cabeza

Debido a que la literatura antropológica tiene una gran variedad de libros de osteología como (Bass, 1971), (Burns, 1998), (White & Folkens, 2005) por mencionar algunos, en los que se muestra con detalle las características de todos los huesos del esqueleto, con imágenes que enseñan su topografía, cómo identificarlos y cómo lateralizarlos, en este texto no se incluyen descripciones de cada uno de los huesos del cráneo de manera individual, sino del cráneo como conjunto y su relación con algunos de los tejidos blandos y las implicaciones de su anatomía en la interpretación de fracturas.

La elaboración de este capítulo, en lo que se refiere a las características anatómicas, se realizó tomando como referencia los textos de Moore, Dalley, & Agur, (2010), Netter, (2004), Sinelnikov (1984), Bangash, Al-Obaid, Bangash, & Bangash (2007) y especialmente los apuntes de las clases de anatomía de la Maestría. Las anotaciones acerca de las implicaciones para el recorrido de las fracturas, en lo que se refiere a la base del cráneo, son producto de la revisión del texto de Vondra (1965) contrastado con las observaciones empíricas de la autora como antropóloga forense.

Empecemos por decir que la cabeza, es un conjunto de capas que recubren el encéfalo. La más externa de éstas es el cuero cabelludo, que recubre la parte superior del cráneo y está formada por varias capas altamente vascularizadas firmemente unidas entre sí, estas capas son: piel, tejido celular subcutáneo, la gálea aponeurótica que se ubica entre el músculo frontal y el occipital y el pericráneo. El cuero cabelludo tiene grosor variable entre cada persona y en ocasiones puede ser mayor a un centímetro, con lo que se convierte en una capa protectora, que amortigua los golpes que el cráneo pueda sufrir.

Más profundo que la gálea está el cráneo, que como se ha mencionado varias veces en este texto, es una compleja estructura formada por 22 huesos planos e irregulares, que se unen entre sí mediante suturas (uniones de fibrocartílago, con movilidad mínima) y

dos articulaciones sinoviales, que permiten amplia movilidad entre los huesos. Las articulaciones sinoviales unen la mandíbula a las cavidades glenoideas de los temporales, en tanto que las suturas fijan todos los demás huesos.

Las suturas mayores son 3: la sutura **sagital**, ubicada en la línea media, une los parietales entre sí y está entre el hueso frontal y el occipital; la sutura **coronal** une el hueso frontal a los dos parietales y la sutura **lamdoidea** une la parte superior del occipital a ambos parietales. Las demás llevan el nombre de los huesos que unen.

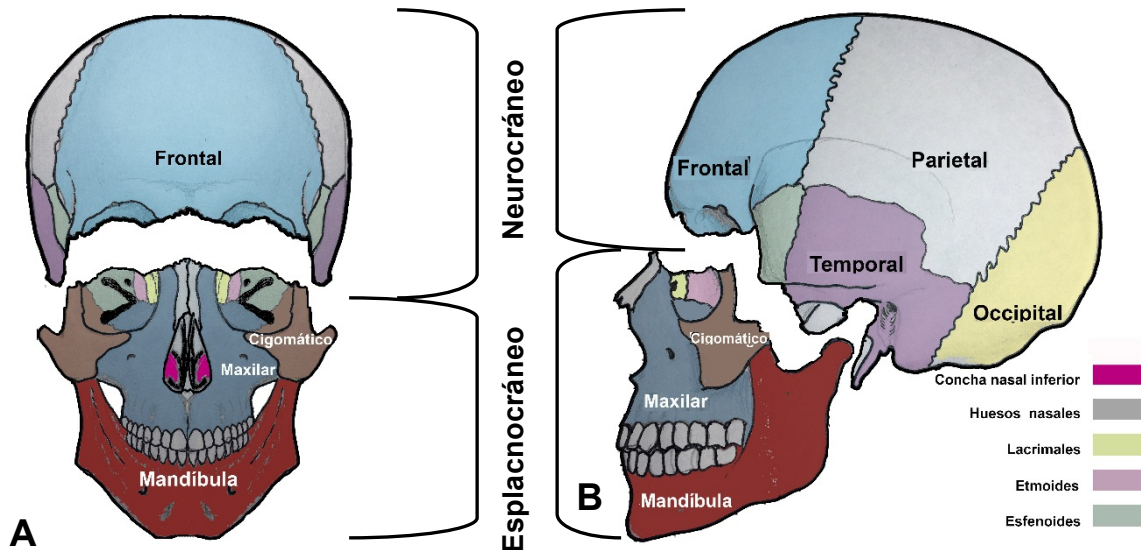
Más profundo aún están el endostio (tejido que reviste la pared interna de los huesos) y las meninges que envuelven el encéfalo. La duramadre es la más externa de las meninges y la más gruesa, las otras dos membranas son la aracnoides y la piamadre, la más profunda y relacionada íntimamente con el tejido encefálico.

En conjunto, los huesos del cráneo forman el neurocráneo y el esqueleto facial (Dibujo 3-1) con un total de 10 cavidades: una para el encéfalo (neurocráneo), dos órbitas para cada uno de los globos oculares, dos fosas nasales, dos conductos auditivos internos, dos externos y una cavidad bucal. Cinco de estas cavidades están en el neurocráneo (cavidad para el encéfalo y los cuatro conductos auditivos) y el resto en el esqueleto facial.

3.1 Generalidades anatómicas del neurocráneo

Los 8 huesos que protegen el encéfalo forman la bóveda (parte superior) y la base. Los huesos de la bóveda son planos, como los parietales, y las partes escamosas (planas y verticales) del frontal, los temporales y el occipital. Estas estructuras tienen tres capas a manera de un emparedado en el que la capa interna y externa son de tejido cortical y la capa del medio corresponde a tejido esponjoso, llamado diploe. La capa interna de tejido cortical forma en su mayoría una superficie cóncava y es más delgada que la capa externa (Boruah, y otros, 2015), que tiene forma convexa. Tanto la forma, como la diferencia en el grosor de las capas producen que la capa interna se rompa primero que la externa ante una carga de energía externa recibida por el cráneo (Berryman & Symes, 1998), (Bonilla, y otros, 2010), como se verá en el capítulo siguiente.

Dibujo 3-1: Vista anterior (A) y lateral de neurocráneo y esplacocráneo (B) en las que se diferencian con colores los huesos que los componen.

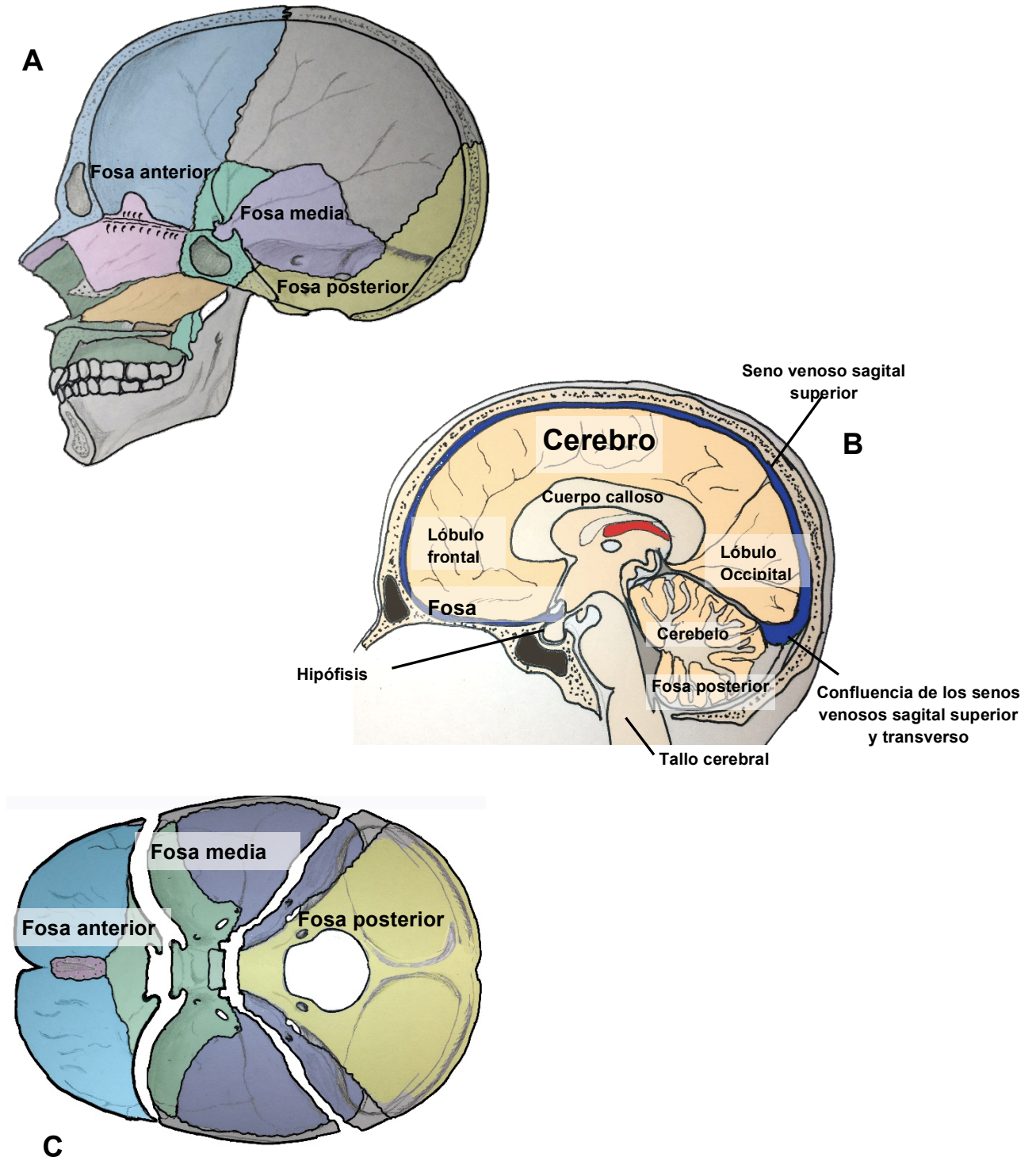


Los huesos de la bóveda recubren y protegen, pero no están expuestos a cargas mecánicas por la tracción de grandes músculos o por el peso de las estructuras que contienen, a diferencia de la base del cráneo, que no sólo recibe el peso del encéfalo, sino que resiste la tracción constante de algunos músculos de la región oral y del cuello. Lo que hace recordar que los huesos de la bóveda son de origen intramembranoso, en tanto que los de la base son de origen endocondral y permite inferir que los huesos de origen endocondral pueden ser más resistentes a cargas mecánicas, que los de origen intramembranoso.

Como se mencionó en el capítulo 2, la base del cráneo puede dividirse en tres fosas, que se ubican en diferentes niveles (Dibujo 3-2 A, B y C). La más anterior y más elevada se conoce como **fosa anterior** y alberga a los lóbulos frontales del cerebro; posterior a ella y en un nivel más inferior se encuentra la **fosa media**, que contiene la hipófisis y los lóbulos temporales; y por último en un nivel más inferior está la **fosa posterior** que contiene el tallo cerebral y el cerebelo.

Las características anatómicas de cada fosa y las implicaciones en los patrones de fractura se muestran a continuación

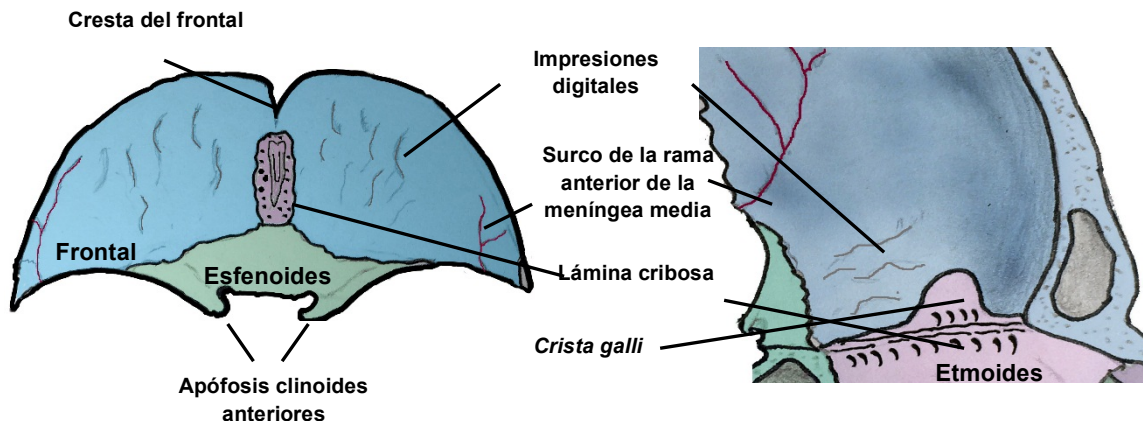
Dibujo 3-2: Fosas de la base del cráneo. (A) vista medial de hemicráneo derecho en la que se muestran los diferentes niveles en los que están las 3 fosas. (B) corte sagital de bóveda neurocráneo en el que se muestra su relación con el encéfalo. (C). Vista superior de las fosas de la base del cráneo. Los colores diferencian los huesos que las componen.



3.1.1 Fosa anterior (Dibujo 3-3. A y B)

Es la menos compleja de las tres, está conformada por el hueso frontal, el etmoides y parte del hueso esfenoides. Está delimitada en la parte anterior por la parte escamosa del hueso frontal y en la parte posterior por la cresta formada por el borde posterior de las alas menores del esfenoides, también incluye la parte las apófisis clinoides anteriores que son proyecciones óseas de las alas menores, que se extienden sobre la fosa en la que se aloja la hipófisis, protegiéndola.

Dibujo 3-3: Vista superior (A) y medial de la fosa anterior (B).



La mayor parte del suelo de la base es formado por la parte horizontal del hueso frontal, que es la lámina que sirve de techo a las órbitas y que a su vez es el área en la que descansan los lóbulos frontales del cerebro⁶; tiene surcos y elevaciones que son las impresiones dejadas por dichos lóbulos. En la línea media, entre la lámina del frontal, está la parte superior del etmoides, que se compone de **la lámina cribosa**, que tiene pequeños orificios que permiten el paso de las fibras del nervio olfatorio hacia y desde el encéfalo a la cavidad nasal. En medio de la lámina cribosa se eleva una cresta vertical, que aunque delgada es muy firme, conocida como *crista galli*, que sirve de anclaje, junto

⁶ Se entiende por **cerebro** la parte superior del encéfalo, que incluye dos hemisferios y en cada uno se hallan los lóbulos frontal, temporal y occipital. El **encéfalo** es la totalidad de estructuras del sistema nervioso que están contenidas en el cráneo.

con la cresta del frontal, para la duramadre que separa los hemisferios del cerebro (hoz del cerebro).

Otras regiones de la anatomía del hueso frontal son los surcos a manera de ramificaciones dejados por la rama anterior de la arteria meníngea media, que, como su nombre lo indica irriga las meninges. En la línea media, de la porción vertical, tiene una cresta de diferentes niveles de proyección que, como ya se dijo, sirve de anclaje para la hoz del cerebro, a los lados de ésta se observan surcos que son producidos por el seno venoso⁷ sagital superior. Finalmente, hay unas cavitaciones asimétricas, llamadas **senos frontales**, ubicadas entre las capas corticales del hueso, en la línea media, entre los arcos superciliares, estos senos hacen parte del conjunto de los senos paranasales⁸ y contienen una membrana mucosa, altamente vascularizada, que ayuda a calentar y a humidificar el aire de la cavidad nasal.

3.1.2 Implicaciones para el análisis de trauma de la fosa anterior

- Debido a que esta fosa está más elevada que las otras dos, es más frecuente que las fracturas transcurran de anterior a posterior, que en el sentido opuesto (Vondra, 1965).
- La lámina del etmoides, por su porosidad, resulta muy sensible a las fracturas y conduce fácilmente la energía (y las fracturas) hacia el esqueleto facial.
- Como la duramadre está firmemente adherida a la lámina cribosa, la más mínima fractura en esta área genera la pérdida de líquido cefaloraquídeo.
- Ante una fractura en esta fosa suele haber rupturas en la rama anterior de la arteria meníngea media y la arteria etmoidal y en los nervios olfatorios.
- Por su relación con la cavidad nasal y las órbitas, las fracturas que alcanzan el etmoides drenan la sangre hacia estas cavidades.

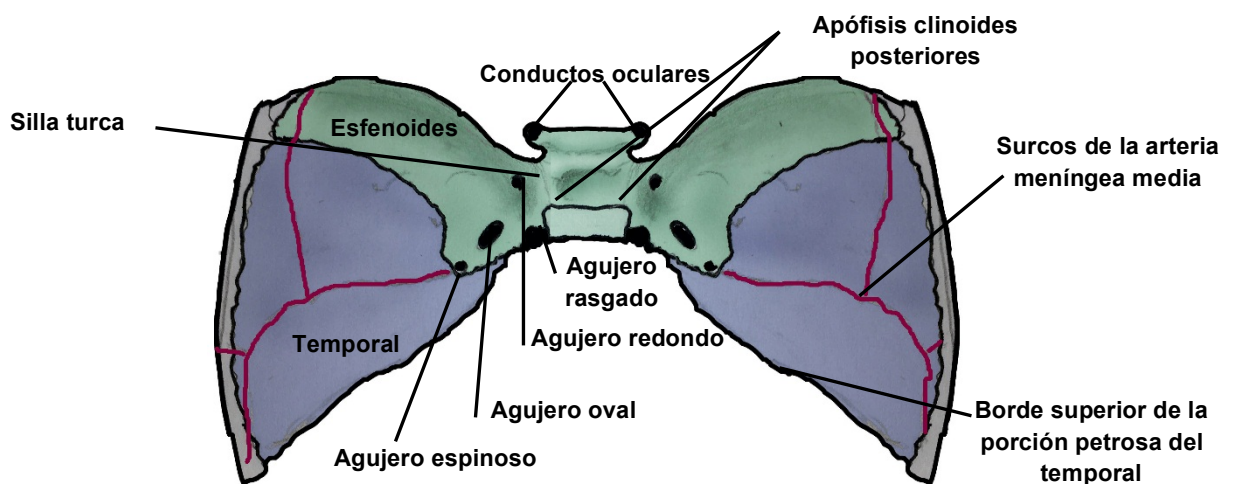
⁷ Los senos venosos craneales son conductos venosos que recogen la sangre del encéfalo y las meninges, están formados por la duramadre.

⁸ Los senos paranasales son un conjunto de cavidades ubicadas en los huesos adyacentes a la cavidad nasal y se comunican con ésta mediante conductos; están recubiertos por una mucosa similar a la de los espacios nasales y contribuyen a la humidificación y calentamiento del aire de la respiración.

3.1.3 Fosa media (Dibujos 3-4 y 3-5)

Es, estructuralmente, la más compleja de las tres, alberga los lóbulos temporales del cerebro y la hipófisis; está formada por parte del esfenoides, parte de los temporales y el borde inferior de los parietales. Está delimitada en el borde anterior y superior por las crestas de las alas menores del esfenoides, en la parte posterior por el borde superior de las porciones petrosas de los temporales y en la región medial posterior por la unión esfenobasilar.

Dibujo 3-4: Vista superior de la fosa media.

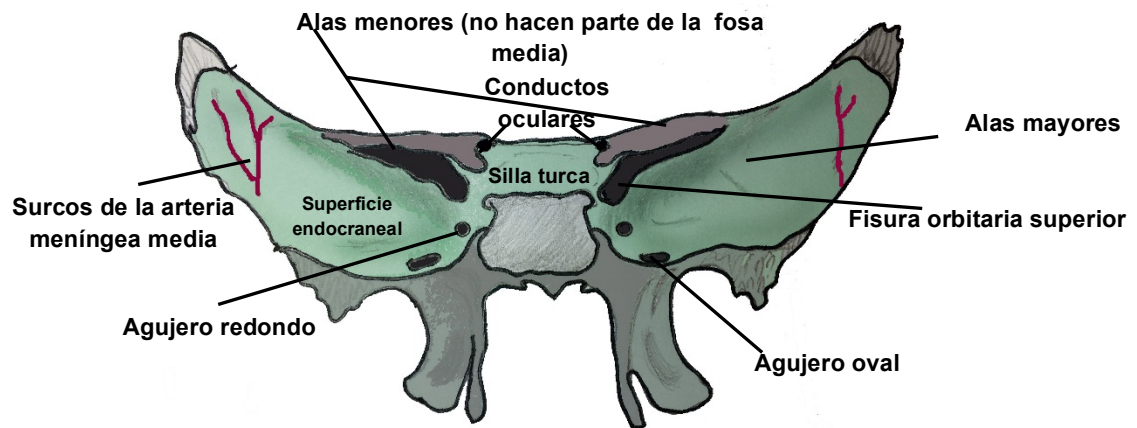


La fosa media tiene dos niveles, uno medial más elevado en el que está el cuerpo del esfenoides, que contiene la silla turca: cavidad para la hipófisis y las apófisis clinoides posteriores; en un nivel más inferior se alojan los lóbulos temporales del cerebro, allí están las alas mayores del esfenoides y una parte de los temporales.

La parte más posterior de la fosa corresponde a la porción petrosa del temporal o pirámide. Estas porciones protegen al oído, que está conformado por el órgano de la audición y el sistema vestibular perteneciente a los órganos del equilibrio y dan curso a los nervios del oído y nervios faciales.

A los lados de la silla turca (Dibujo 3-5), en el esfenoides, están ubicadas una serie de perforaciones, las cuales se mencionan a continuación de acuerdo con su ubicación de superior a inferior y de anterior a posterior:

Dibujo 3-5: Vista posterior del hueso esfenoides. Se señalan los componentes que hacen parte de la fosa media.



- Conducto óptico: se encuentra ligeramente medial e inferior a la base de las apófisis clinoides anteriores y contiene el nervio óptico y la arteria oftálmica.
- Fisura orbitaria superior: la parte más profunda de las órbitas por la que pasan los nervios oculomotores, el nervio oftálmico que lleva fibras sensitivas para el ojo y la cara y parte de la red vascular para las órbitas. Estas fisuras están inferiores a las menores del esfenoides, por lo que para verlas hay que observarlas desde anterior o posterior (Dibujo 3-5).
- Agujero redondo o redondo mayor: por él pasa el nervio maxilar.
- Agujero oval: por él cruzan el nervio mandibular y la arteria menígea accesoria.
- Agujero espinoso redondo menor: por el que va la arteria menígea media.
- El agujero rasgado anterior: se forma por un espacio entre el esfenoides y la base del occipital y por él pasa por él pasa el nervio petroso mayor, rama del nervio facial.

3.1.4 Implicaciones para el análisis de trauma de la fosa media

- Las fracturas en esta zona son las más frecuentes porque se generan a partir de la energía transmitida por los cóndilos mandibulares a las cavidades glenoideas de los temporales en eventos que involucran golpes en la mandíbula; por fracturas que vienen desde la bóveda craneal o por fracturas que se transfieren desde la fosa anterior.

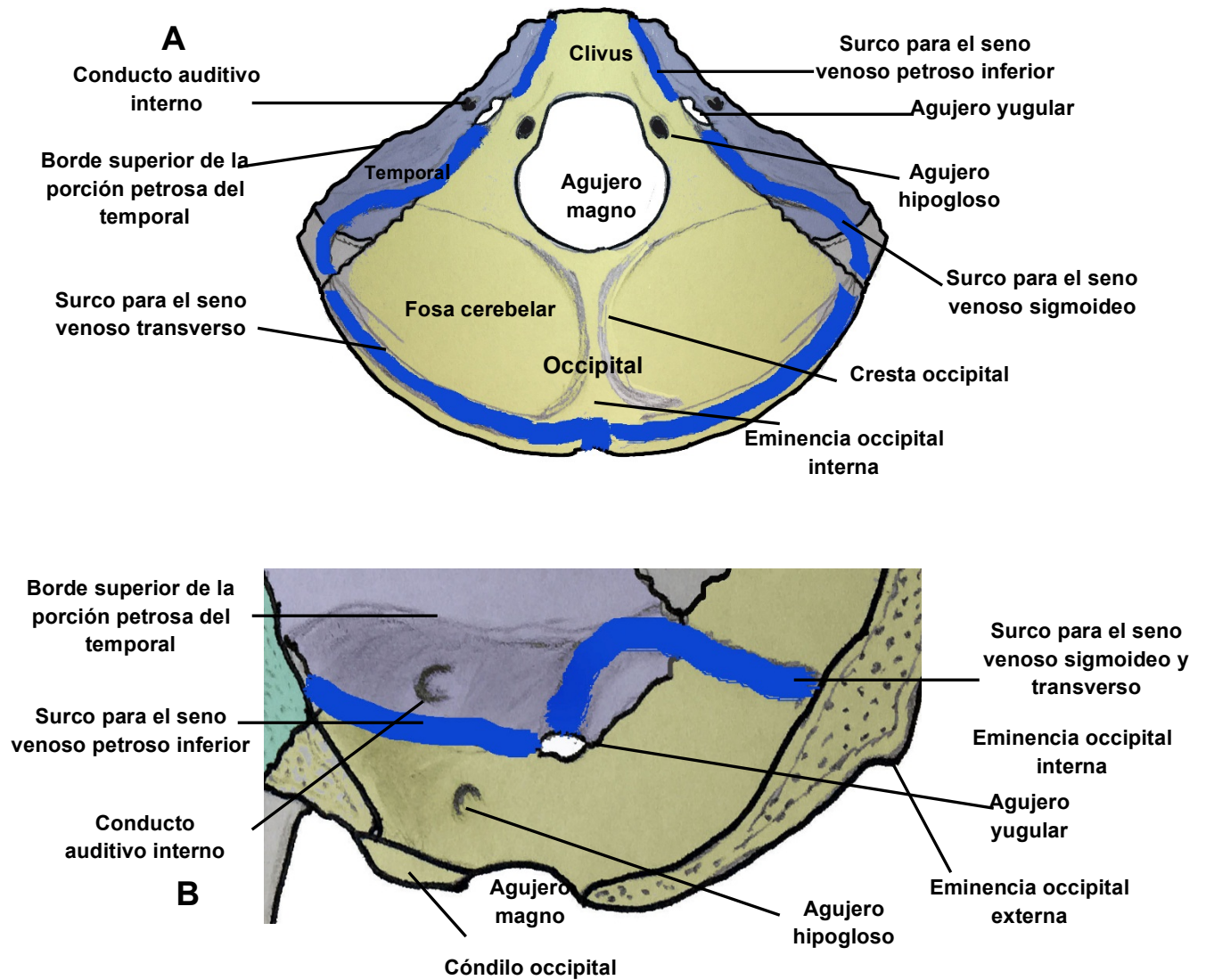
- Las áreas más susceptibles de ser fracturadas son: la sucesión de orificios del esfenoides; la unión entre el esfenoides y la escama del temporal y la zona en la que se une la parte escamosa y la porción petrosa del temporal.
- La estrecha relación que existe entre esta fosa y las órbitas generan que ante una fractura en la fosa, se formen acumulaciones de sangre extravasada en las regiones palpebrales.
- El cuerpo del esfenoides y la porción petrosa de los temporales son también susceptibles de ser fracturados, ya que en el cuerpo del esfenoides se localiza el seno del esfenoides, uno de los senos paranasales, y que el canal auditivo debilita a la estructura.

3.1.5 Fosa posterior (Dibujo 3-6. A y B)

Es la más grande y más inferior de las tres, está compuesta por el hueso occipital y la parte posterior de los temporales. Aloja al cerebelo, y al tallo cerebral compuesto por el mesencéfalo, puente y bulbo raquídeo. Su frontera anterior es el borde superior de la porción petrosa del temporal y la unión esfenobasilar; en la parte posterior está delimitada por el surco para el seno venoso transversal.

Lo más notorio de esta fosa es el agujero magno, el más grande del cráneo, por el cual pasa la prolongación del bulbo raquídeo para convertirse en cordón espinal que va por el conducto vertebral. Este agujero está en la línea media, en la parte más inferior de la fosa, en el hueso occipital.

En cada lado del occipital hay una fosa de forma ovoide sobre la que descansa un hemisferio del cerebelo, llamada fosa cerebelosa. Estas fosas están separadas por la cresta occipital, que es un engrosamiento del tejido óseo, que va por la línea media, desde la región posterior del agujero magno, hasta la eminencia occipital interna, que a su vez coincide con la ubicación de la eminencia occipital externa. El hueso de la parte más profunda de las fosas cerebelosas es muy delgado, de una sola capa de tejido cortical.

Dibujo 3-6: Fosa posterior. (A) Vista superior. (B) vista medial.

Otros accidentes anatómicos de la fosa posterior son:

- Clivus: rampa descendente desde la unión eseno-occipital hasta el agujero magno, sobre esta rampa descansa el tallo cerebral⁹.

⁹ Parte más inferior del encéfalo, que comunica las partes más superiores con la médula espinal.

- Conducto auditivo interno: por él atraviesan el nervio pasan el nervio estato-acústico y el nervio facial.
- Agujero yugular o rasgado posterior: es amplio, formado por dos escotaduras, una en la porción petrosa temporal y otra en el occipital. Tiene dos “cavidades” una antero-medial para los conductos neuronales y las ramas venosas del seno petroso inferior, que van a llegar a la vena yugular y otro postero lateral por el que pasa la vena yugular interna y la arteria meningea posterior.
- Agujero hipogloso: por éste cruza el nervio hipogloso, que va para la lengua.
- Surco para el seno petroso inferior: se forma en la parte anterior del agujero yugular, por la sutura occipito mastoidea.
- Surco para el seno sigmoideo: es un surco amplio en forma de “S” que compromete la parte lateral del occipital y la base de la porción petrosa del temporal.
- Surco para el seno transverso: es un surco amplio que atraviesa transversalmente el occipital al nivel de la eminencia occipital.

3.1.6 Implicaciones para el análisis de trauma de la fosa posterior

- Si se mira con atención, puede verse que la fosa posterior tiene un área de engrosamiento que va desde el clivus, bordea el agujero magno y se une posterior a éste formando la cresta del occipital y tiene su punto máximo de engrosamiento en la región donde se ubican las eminencias occipitales interna y externa. Ésta es un área de reforzamiento que tiende a evitar el paso de fracturas, especialmente en impactos de baja energía (ver capítulo 4), generando que se fracturen más frecuentemente las áreas adyacentes.
- Alrededor de este anillo hay orificios como el canal hipogloso que muchas veces es el punto terminal de fracturas longitudinales completas que cruzan la fosa posterior por el meato auditivo interno.
- Las fosas cerebelosas se fracturan principalmente por impactos recibidos en la región inferior a la eminencia occipital, son más sensibles que el resto de la base porque tienen el tejido más delgado. Las fracturas en esta área suelen ser longitudinales y pueden extenderse hasta el agujero hipogloso, evitando las áreas de reforzamiento del hueso.

- En muchas ocasiones, las fracturas de la fosa media llegan hasta la posterior atravesando a través del conducto auditivo interno, si no se detienen ahí pueden llegar hasta el agujero yugular.
- Los surcos para los senos venosos sigmoideos suelen ser más sensibles a las fracturas que la sutura occipito mastoidea, cuando los impactos son recibidos en la región mastoidea.
- De acuerdo con Vondra, las fracturas más comunes en la fosa posterior son las que atraviesan desde la fosa media por el conducto auditivo interno o las que van a lo largo de la fosa que se forma entre la porción petrosa del temporal y terminan en el agujero yugular. De acuerdo con los criterios propios, este último tipo de fracturas continúa hacia anterior separando los huesos temporal y occipital.

3.2 Generalidades anatómicas del esplacnocráneo

El esplacnocráneo está compuesto por un total de 14 huesos (Dibujo 3-7), la mayoría irregulares, que son: nasales, lacrimales, cigomáticos, maxilares, conchas nasales inferiores y palatinos (huesos pares); vómer y mandíbula (huesos impares). 13 de ellos están fijos y sólo uno es móvil: la mandíbula, que es a la vez el hueso más grande y fuerte de todos.

En conjunto configuran las cavidades orbitarias, nasales y la bucal. Las orbitarias y la nasal están compuestas por una combinación de huesos del neurocráneo (frontal, etmoides y esfenoides) y los huesos del esplacnocráneo.

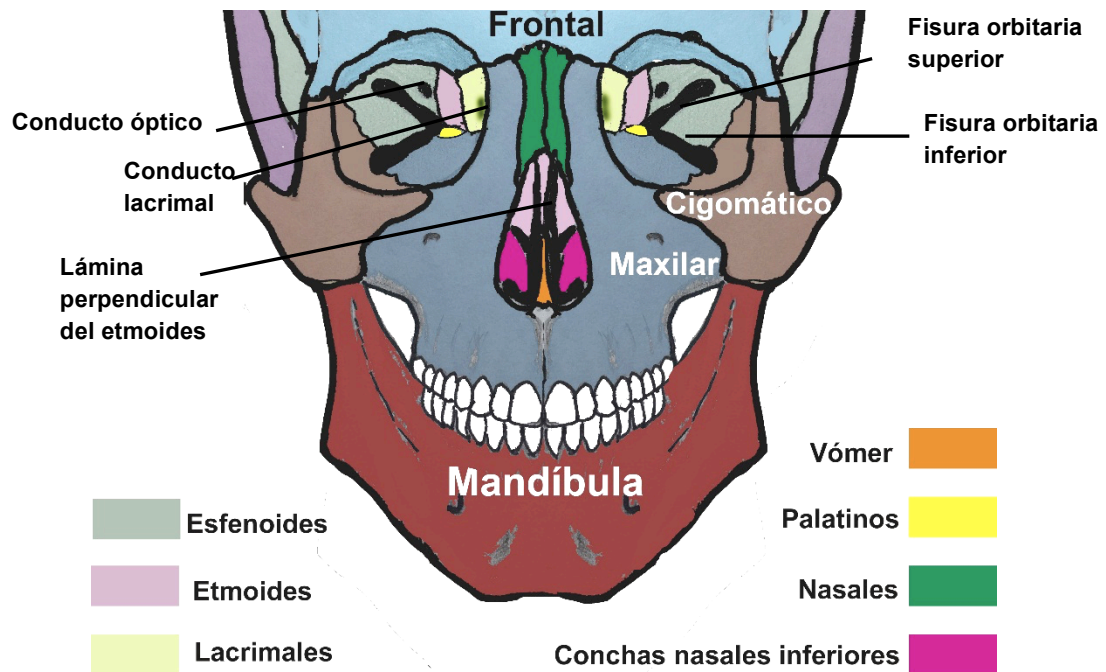
Las órbitas son cavidades que tienen una forma similar a la de una pirámide, con la base hacia anterior y el ápice hacia posterior. Contienen los globos oculares y los músculos asociados y otros tejidos asociados. En el ápice 3 aperturas por las cuales salen e ingresan los vasos y nervios necesarios para irrigar y llevar y recibir información asociada con la visión; estas aperturas son: conducto óptico, fisura orbitaria superior y fisura orbitaria inferior (Dibujo 3-7) y comunican con la cavidad del neurocráneo.

Las dos órbitas requieren de la unión de 11 huesos: el frontal, que forma la parte anterior de los techos y el esfenoides que forma la parte más profunda y parte de las paredes

laterales junto con los cigomáticos; en las paredes mediales están involucrados el etmoides, los lacrimales, los maxilares y los palatinos.

Las cavidades nasales están bordeadas externamente por lo que se denomina apertura pirforme (en forma de pera). Delineada, en la parte superior, por los huesos nasales y por los maxilares. Internamente están involucrados el etmoides, el esfenoides, los palatinos y las conchas nasales inferiores y el vómer. La lámina perpendicular del etmoides y el vómer dividen la región en dos cavidades.

Dibujo 3-7: Esplacnocráneo.



Dentro de las cavidades nasales se localizan fibras nerviosas que llevan información del sentido del olfato; también la mucosa tiene la función de limpiar el aire, ya que en ellas se adhieren partículas extrañas. Estas mucosas también coadyuvan en el calentamiento y humidificación del aire en su paso hacia las vías aéreas inferiores.

La cavidad bucal está formada por los huesos palatinos, los maxilares y la mandíbula. Estos dos últimos forman una doble arcada en la que están incluidos los dientes. La mandíbula es un hueso diferente si lo comparamos con las demás estructuras del

esqueleto facial. Es más robusto, formado por tres capas de hueso, es el único hueso móvil de la cara y está atado al neurocráneo mediante unos potentes músculos, que se ubican en la región lateral: los músculos temporales y los maseteros, y medial los pterigoideos lateral y medial. Estos músculos dejan impresiones tanto en la región lateral de la bóveda del cráneo, como en el ángulo de la mandíbula.

4. Aproximación a la biomecánica y al análisis de fracturas en el cráneo

La biomecánica aplica principios de la física y la ingeniería para aproximarse a la comprensión de los resultados de la interacción de fuerzas en los organismos vivos. Los conocimientos derivados de ella resultan de gran utilidad para la antropología forense pues ayudan a entender los mecanismos de fuerzas que interactúan en el cráneo y los de producción de fracturas y al hacerlo, aproximan al investigador a la identificación de puntos de impacto y dirección de las cargas recibidas por los huesos a partir de la observación de los patrones de fractura.

4.1 Nociones básicas de biomecánica

Se presentan a continuación algunos términos que son fundamentales para una mejor comprensión de este capítulo. Para la exposición de estos términos, se toman como referencia los textos de Evans (1957), Gozna (1982), Harkess, Ramsey, & Ahmadi (1984), Kieser (2013), Cortés (2016) y Wescott (2017). Para evitar confusiones y debido a que los términos aquí utilizados son producto de la traducción de la autora, junto a cada término y entre paréntesis aparece la palabra en inglés, que es el idioma en el que estos textos fueron escritos.

4.1.1 Fuerza (*Force*)

Es una acción o influencia, como halar o empujar, que al ser aplicada sobre un cuerpo tiende a acelerarlo o deformarlo. De acuerdo con Evans (1957), no es conveniente hablar de “fuerza” en el análisis de trauma, a menos que se conozcan todos los componentes de ésta, como su línea de acción, dirección y magnitud, lo cual sólo se logra establecer en estudios en ambientes controlados y con la tecnología adecuada. A cambio de esto,

recomienda expresarse en términos de **carga** o **energía absorbida** cuando se hace referencia a los factores que producen fracturas en los huesos.

4.1.2 Carga (*Load*)

Es la fuerza, o fuerzas, ejercidas sobre un cuerpo, la cual genera un esfuerzo en éste.

4.1.3 Energía (*Energy*)

Es la capacidad de hacer un trabajo. Puede ser energía cinética (de movimiento), potencial, calórica o lumínica. En el caso de la energía cinética y potencial dicha capacidad depende de factores como: la masa de un cuerpo, la velocidad a la que se desplaza o la altura desde la que se precipita: La energía puede ser transferida de un cuerpo a otro hasta disiparse.

4.1.4 Esfuerzo (*Stress*)

Resistencia interna a la deformación o la fuerza interna generada dentro de una sustancia como resultado de la aplicación de una carga.

4.1.5 Deformación (*Strain*)

Cambio en las dimensiones lineales de un cuerpo, como resultado de la aplicación de una fuerza o carga.

4.1.6 Compresión (*Compression*)

Es la aplicación de cargas en sentidos opuestos, apuntando hacia el objeto, ejercidos sobre un mismo eje. Causa deformación como pérdida de longitud y el aumento de su grosor (Dibujo 4-1, B).

4.1.7 Tensión o tracción (*Tension o traction*)

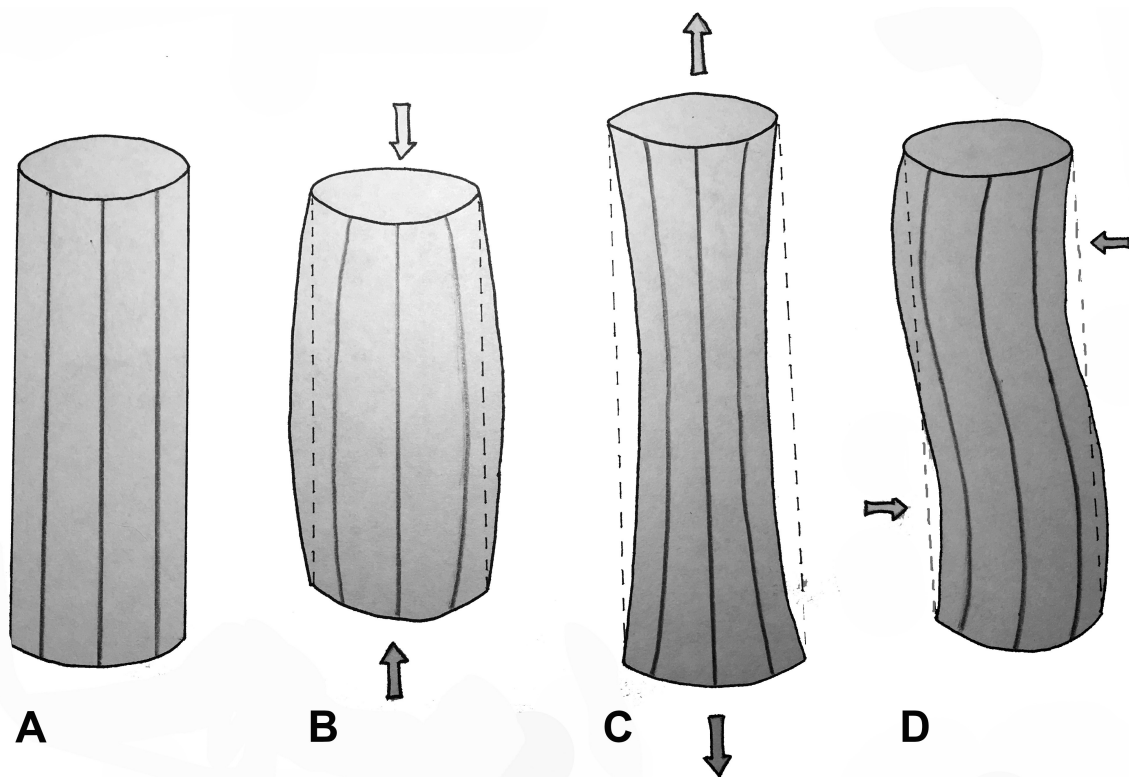
Cuando hay cargas en direcciones opuestas sobre un mismo eje, que se alejan del elemento (Dibujo 4-1, C). La deformación de un cuerpo causada por la tensión es el aumento de las dimensiones en el sentido en el que las fuerzas se alejan y el adelgazamiento en el sentido perpendicular.

Es difícil encontrar tensión o compresión puros sobre un elemento, normalmente se presentan de manera compuesta, por ejemplo al doblar un elemento, existe compresión de un lado y tensión en el lado opuesto.

4.1.8 Cizalla (*Shear*)

Es cuando las cargas están en direcciones opuestas, paralela una a la otra. Genera tensión y compresión al mismo tiempo sobre el elemento (Dibujo 4-1, D).

Dibujo 4-1: Deformaciones por tensión (B), compresión (C) y cizalla (D). La figura (A) representa a un cuerpo en reposo, la figura (B) representa el efecto de la compresión, la figura (C) representa la tensión y la (D) representa la cizalla. Las flechas indican la dirección de las fuerzas y las líneas punteadas, recuerdan la anchura original del cuerpo en reposo.



4.2 Propiedades biomecánicas de los huesos

Los huesos humanos son **anisotrópicos**, es decir que resisten de manera diferente las cargas, dependiendo del sentido en el que sean aplicadas. Lo anterior es debido a que

su forma no es homogénea y a que cada uno está conformado por tejido de diferentes grosores y composiciones, como se vio en los capítulos precedentes.

La **elasticidad** es la capacidad que tiene un elemento para cambiar su forma ante la aplicación de una carga y retornar a ella luego de retirarla. Los huesos tienen un componente de elasticidad debido a que están formados en parte, por fibras de colágeno. La elasticidad ayuda a soportar la tensión.

Los huesos también son **viscoelásticos**, debido a la gran humedad que presentan la humedad ofrece viscosidad, que a su vez genera fricción durante el cambio de forma y retarda un poco las consecuencias de la aplicación de una fuerza. Quizá para facilitar la comprensión de este término, valga introducir el ejemplo de un amortiguador, el cual está compuesto por un tubo y un émbolo, dentro del tubo puede haber aire o algún líquido que impide que al ejercer presión sobre el émbolo, sea introducido rápidamente dentro del tubo.

La rigidez o **dureza** (*stiffness*) es la resistencia que ofrece un material ante los cambios que pueda producir una carga, en los huesos la dureza o rigidez depende del componente inorgánico (ver capítulo 1), el cual les confiere la capacidad de soportar la compresión, dado que el hueso tiene un mayor componente inorgánico, la mayoría de las estructuras óseas soporta mejor la compresión, que la tensión.

La energía se transmite con más facilidad en tejidos en los que las fibras están alineadas en el sentido de la aplicación de la carga (Dempster, 1967), por esto es que cada hueso presenta una distribución diferente de las fibras y concentraciones del tejido, ya que como lo planteó Wolff¹⁰ --muchos años antes de que se comprendiera más a profundidad cómo funcionan los mecanismos de remodelación del hueso— los cambios en las cargas que reciben los huesos generan cambios en la estructura de los mismos.

4.3 Características biomecánicas del cráneo

Las características biomecánicas del cráneo están determinadas, en primer lugar, por el hecho de estar compuesto por dos segmentos (neurocráneo y esplacnocráneo), que

¹⁰ Every change in the form and function of bone or of their function alone is followed by certain definite changes in their internal architecture, and equally definite alteration in their external conformation...” Ley de Wolff, citada por Solano (2006)

tienen formas muy diferentes y que están estrechamente relacionados entre sí (ver capítulo 3), lo que implica que cualquier carga o fractura será transmitida de un segmento al otro, siempre y cuando comprometa alguno de los huesos que comparten.

En segundo lugar está la ubicación de las áreas de engrosamiento o de debilidad en los huesos, la cual determinará los recorridos de las cargas propias del cráneo, que se harán a través de las áreas más fuertes o de las fracturas, que tienden a buscar las áreas más débiles ya que les ofrecen menos resistencia (Evans, 1957), (Gozna, 1982), (Harkess, Ramsey, & Ahmadi, 1984). Por lo anterior no se puede hablar de biomecánica del cráneo sin pensarlo como un todo y sin entender cuáles son los caminos de comunicación mecánica entre sus componentes.

De acuerdo con Dempster (1967), Los huesos del cráneo están sometidos al menos a tres tipos de cargas, a saber:

- Al servir de contenedor del encéfalo y los órganos de los sentidos, los movimientos del cuerpo pueden generar fuerzas centrífugas y de aceleración que representan cargas de dentro hacia afuera en los huesos, teniendo que ser contenidas especialmente por la superficie externa de cada estructura ósea, principalmente por los huesos de la bóveda. Quizá sea esta la explicación al hecho de que la cortical externa de los huesos de la bóveda sea más gruesa que la interna y que, como menciona Dempster, en los huesos de la calota, el grano del tejido cortical no esté dispuesto de una forma alineada y paralela, sino que tiene una forma irregular.
- La función de servir de punto de apoyo para los músculos, genera una interacción constante de la tracción que ejercen los músculos y la compresión con la que responden para no quebrarse. La base de cráneo y los huesos de la cavidad bucal son los que están expuestos principalmente a estas cargas. Dempster, observó que las espinas y las apófisis que sirven de inserción muscular tienen el tejido alineado en la dirección en la que son traccionados por los músculos.
- Las fuerzas que no tienen que ver con el organismo.

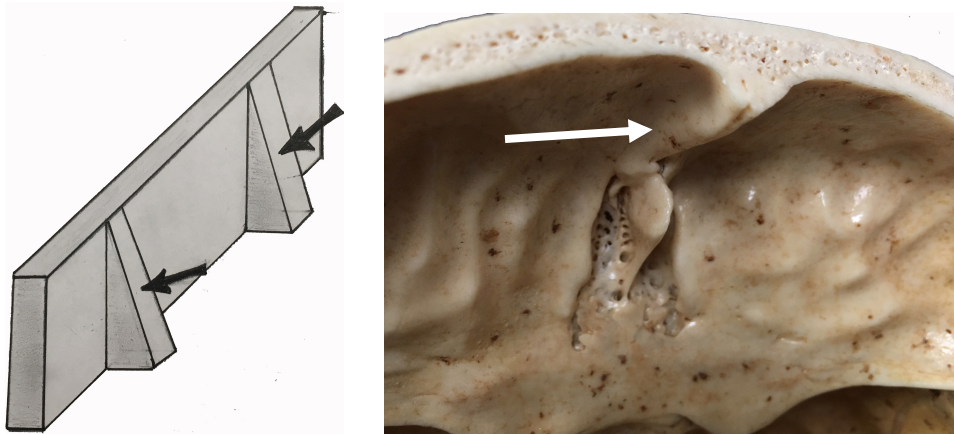
Para entender cómo se comporta el cráneo frente a estas cargas, se han hecho comparaciones entre el cráneo y estructuras arquitectónicas (Pollock, 2012), usando

términos de la arquitectura como *buttresses* y *flying buttresses*, *pillars*, *beams and archs* (Ferré, Le Cloarec, Chevalier, Barbin, & Barbin, 1988) (Pollock, 2012); que en español son traducidos por la autora como: contrafuertes, arbotantes, pilares, vigas y arcos, respectivamente.

Las comparaciones surgieron luego de la observación de las iglesias monumentales, con grandes techos que requerían columnas que los sostuvieran sin poner en riesgo la estabilidad del edificio, para esto los arquitectos de la época resolvieron poner contrafuertes (*buttresses*) (Dibujo 4-2, A), que son prolongaciones perpendiculares, ubicadas en la parte externa de las paredes, para ayudar a soportar el peso sin perder su posición vertical. Con algo de imaginación podemos ver una formación similar a esta en las áreas que presentan crestas como la línea media del frontal y del occipital (Fotografía 4-1), en las alas menores del esfenoides y en el borde superior de los procesos petrosos del temporal (Bonilla, y otros, 2010).

Dibujo 4-2: Contrafuerte.

Fotografía 4-1: Detalle cresta sagital y *crista galli* en la fosa anterior como contrafuertes.

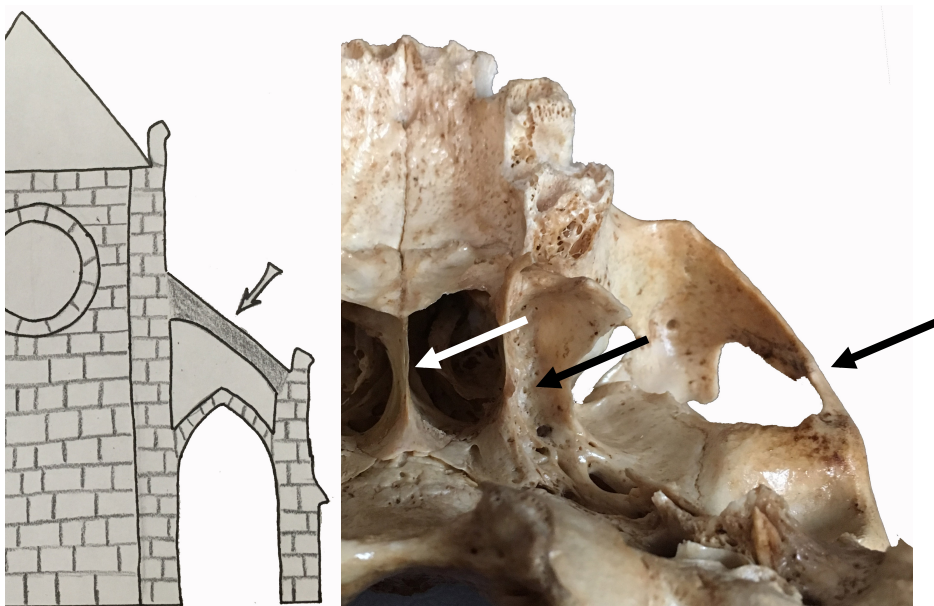


La arquitectura tiene suficientemente claro que la forma ovoide o arqueada conduce fácilmente las cargas hacia su base, por eso los arquitectos medievales usaron los arbotantes (*flying buttresses*) (Dibujo 4-2, B) para recibir el peso de un techo en un arco y llevar su carga hacia un contrafuerte, que se encuentra separado de la pared, y así ayudar a las columnas principales a soportar el peso, dándole estabilidad a la estructura.

Al igual que en la arquitectura, el arco que sostiene los dientes, está unido al resto de la estructura del cráneo mediante pilares (vómer, apófisis pterigoides) y arbotantes como los arcos cigomáticos (Dibujo 4-3 y Fotografía 4-2). Todas estas estructuras son las áreas por las que se pasa la energía de las cargas de la masticación en la arcada maxilar superior hacia la base del cráneo. Otro arco que transmite cargas a la base del cráneo es la mandíbula, que las transmite a través de sus ramas y cóndilos.

Dibujo 4-3: Arbotante o arco flotante.

Fotografía 4-2: Detalle vista infero-posterior de las regiones cigomaxilar y temporo-cigomática, en la que se resalta con flechas la ubicación de áreas de reforzamiento



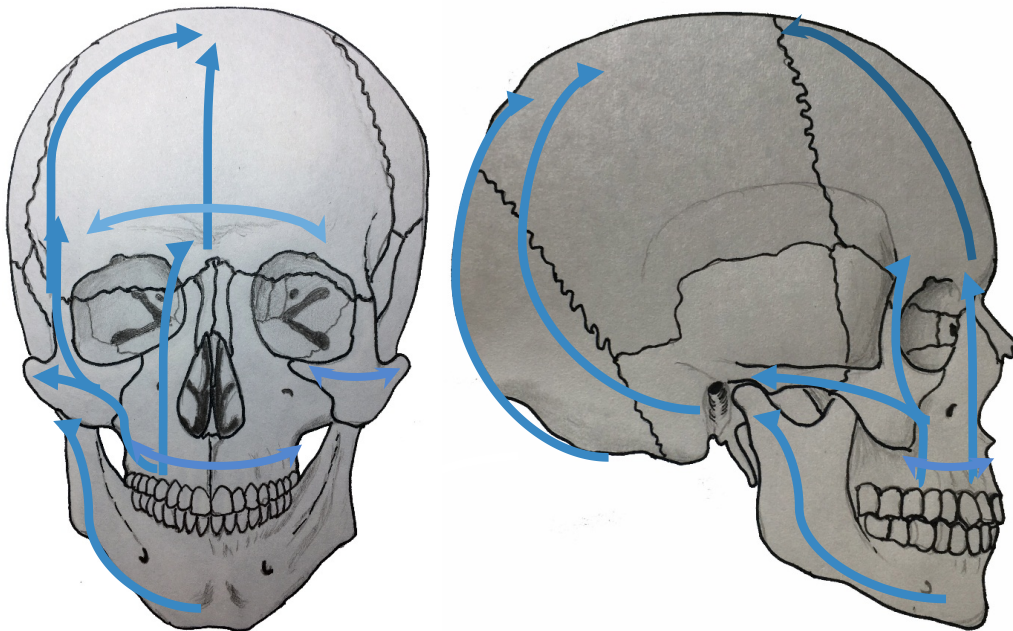
Existen otros tipos de refuerzos estructurales, como los engrosamientos en el tejido, que forman una especie de columnas y travesaños, que conducen la energía hacia los bordes de las cavidades de manera que no se lesionen las estructuras internas, como se muestra en los dibujos 4-2 (A y B) y las fotografías 4-3 y 4-4.

Al igual que en un edificio, aparte de las áreas de refuerzo, existen paredes delgadas, cuya única función es separar una cavidad de otra, estas áreas más débiles también se observan claramente en las fotografías mencionadas que muestran diferentes vistas de un cráneo al que se ha introducido una fuente luminosa, al hacerlo pueden observarse en color oscuro, las áreas cuyo reforzamiento no permite el paso de la luz y aquellas más delgadas que son atravesadas fácilmente por la iluminación.

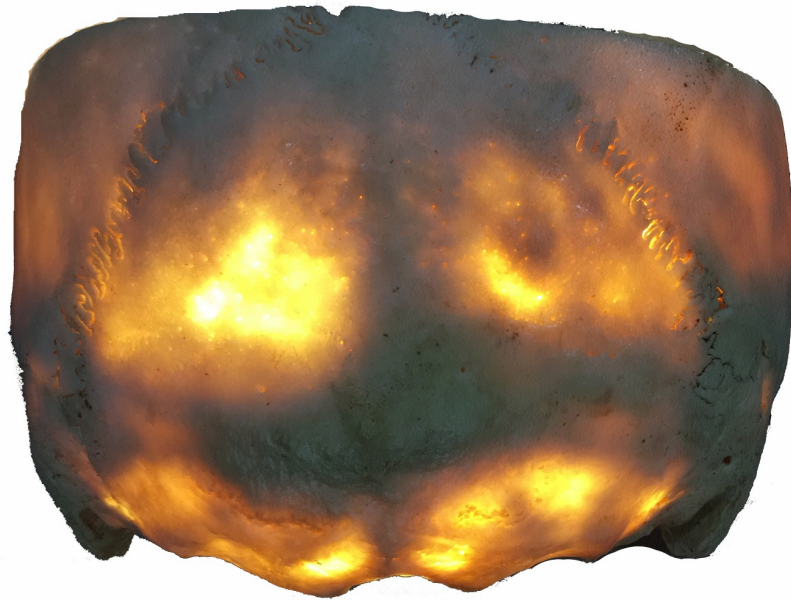
Las áreas débiles son más susceptibles de ser fracturadas, pero no sólo son aquellas que tienen tejido óseo muy delgado, también son las que tienen varios orificios próximos como la fosa media; las que tienen surcos, como los de las arterias o los seno venosos, las uniones de los huesos y las bases de los arcos, que al transmitir una carga que excede la capacidad del hueso pueden romperse en la parte más frágil, como ocurre en los cuerpos maxilares, ante un impacto en el arco cigomático o en el cuello de los cóndilos mandibulares antes fuertes impactos en el mentón.

Esta combinación de áreas de reforzamiento y zonas ligeras tiene como consecuencia la transmisión de cargas propias hasta el vértice del cráneo por las áreas de reforzamiento y transmisión de fracturas por las áreas más débiles, que ofrecen menor resistencia.

Dibujo 4-4: Áreas de reforzamiento del cráneo, vista anterior (A), vista lateral (B).



Fotografía 4-3: Vista posterior de los dos tercios inferiores del cráneo.



Fotografía 4-4: Vista inferior de la base del cráneo.



Autores como Ferré y colaboradores (1988), no están completamente de acuerdo con la idea de que los pilares y las vigas del cráneo, pueden ayudar a distribuir de una manera adecuada las cargas. Según ellos lo que realmente la fácil distribución de sus cargas mecánicas es el hecho de que la bóveda está constituida por huesos planos en forma de emparedo, cuya estructura facilita la transmisión de cargas tangenciales en el cráneo. Con lo anterior se reafirma, que las propiedades biomecánicas de los huesos no dependen solamente de un factor, sino de la integración de todas las propiedades biológicas de los huesos

4.4 Biomecánica de las fracturas

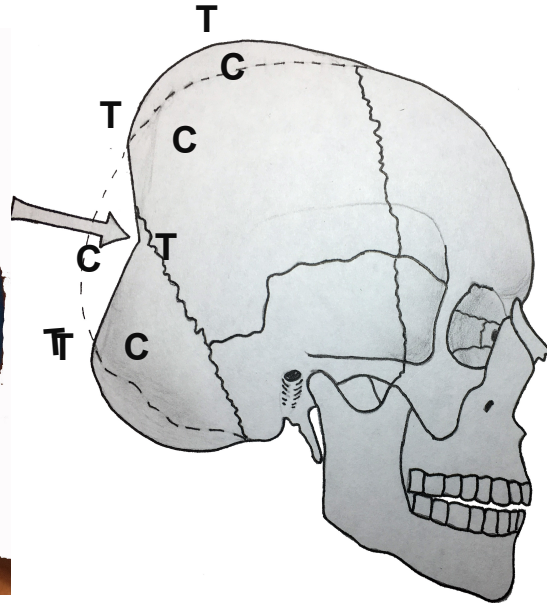
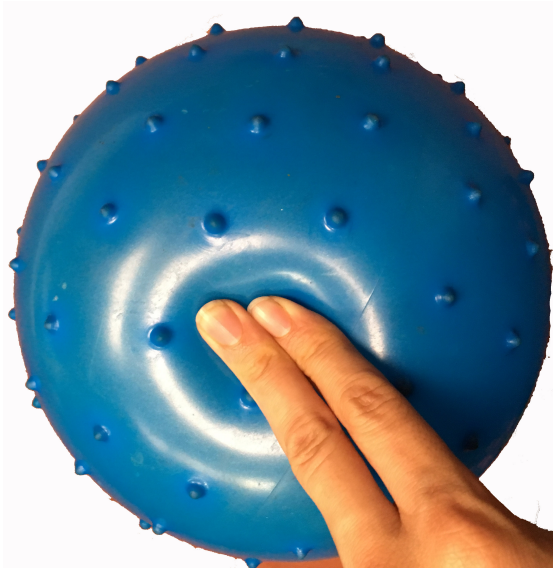
Cuando las cargas que recibe un hueso son superiores a lo que puede soportar, ocurren pérdidas en la continuidad del tejido o **fracturas**. Se denominan **fracturas patológicas** a aquellas que ocurren en un área delimitada por una patología, las cargas que producen esta fractura habrían podido ser soportadas por un hueso en condiciones normales (Harkess, Ramsey, & Ahmadi, 1984). Un ejemplo de este tipo de fracturas en las estructuras del cráneo, es por ejemplo, la fractura de mandíbula en una persona edéntula total, con pérdida de masa ósea, cuyo cuerpo mandibular se encuentra considerablemente reducido en su tamaño.

Las fracturas pueden producirse por una carga **directa** en el área en la cual ocurren, o por carga **indirecta**, que es ejercida sobre un punto alejado y que lesiona debido a la transmisión de energía del impacto recibido.

Para la comprensión de las fracturas en el cráneo es necesario tener en cuenta que la bóveda es de forma redondeada, y se comporta como un globo al ser presionado (Symes, L'Abbe, Chapman, Wolff, & Dirkmaat, 2012) y la manera en la que se distribuyen las cargas generan fracturas radiales a partir del punto de impacto y concéntricas alrededor de éste. Las fotografías 4-5 a 4-8 y el dibujo 4-5 ilustran la manera en la que se deforma el cráneo y las fracturas que producen. En las fotografías 4-6 a 4-8 se muestran fracturas por tensión es decir, en la superficie interna del punto de impacto en donde se forma una especie de 'asterisco' por la presencia de fracturas radiales, que no son visibles en la superficie externa; y las fracturas concéntricas, que se forman por la tensión en la superficie externa del área adyacente al área del golpe.

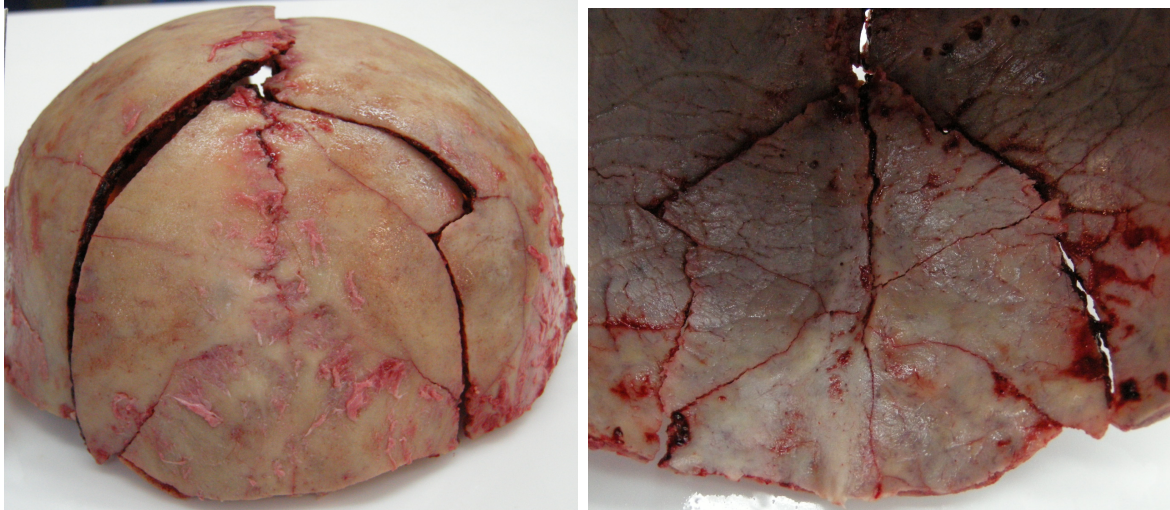
Fotografía 4-5: Deformación causada al presionar un globo inflado. El área más brillante del globo muestra la región con tensión alrededor del punto de presión.

Dibujo 4-5: deformación causada en un cráneo por un golpe en la región posterior. Las líneas punteadas representan la forma original del cráneo, las letras T y C, muestran el lugar de la tensión y la compresión, respectivamente.



Fotografía 4-6: Vista externa de fractura concéntrica en una calota de cráneo, (izquierda).

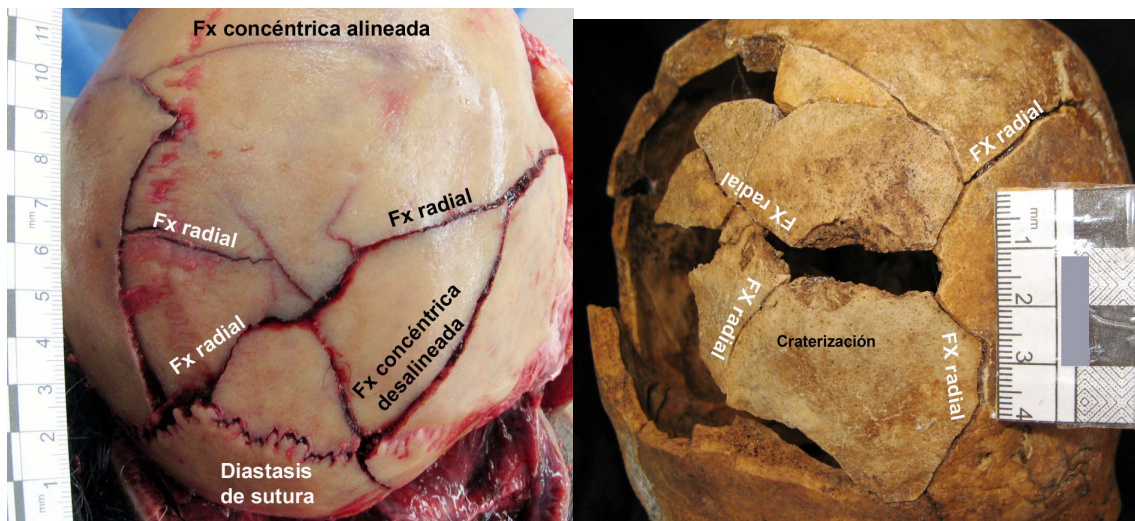
Fotografía 4-7, Vista interna de fractura concéntrica y fracturas radiales en la misma calota de la imagen anterior. Nótese que no se observan estas fracturas en la superficie externa. Las fracturas fueron ocasionadas por un único golpe en la región lambdaidea por caída en una escalera.



Nombre de la fuente: (Campos V. , Consideraciones para el análisis de fracturas óseas: una mirada desde la antropología, 2014)

Fotografía 4-8: Fracturas causadas por la deformación del cráneo ante un impacto por mecanismo contundente (izquierda).

Fotografía 4-9: Fracturas causadas por la deformación del cráneo ante un impacto por proyectil de arma de fuego.



Nombre de la fuente: (Campos V. , Consideraciones para el análisis de fracturas óseas: una mirada desde la antropología, 2014) y (Campos V. , Introducción al análisis antropológico de lesiones por proyectiles de armas de fuego y explosivos en hueso, 2014)

Los estudios de Guirdjian y sus colaboradores entre 1944 y 1953 (referenciados por Evans, 1957), permitieron concluir que los huesos de la bóveda craneal se rompen primero por tensión que por compresión, de aquí la presencia de estas fracturas tan

características. En esos estudios también se concluía que las fracturas radiales en la superficie externa iniciaban en la parte más convexa alrededor del punto de impacto y luego convergían en un punto central, pues se consideraba que todas las fracturas iniciaban siempre en los puntos de mayor tensión, pero estudios recientes (Kroman, Kress, & Porta, 2011) refutan esta idea e insisten en que las fracturas radiales, inician en el punto central y luego se extienden hacia los lados.

La energía y la velocidad determinan la manera en la que el hueso resiste las cargas recibidas, pues como lo mencionan Symes y colaboradores (2012), cuando un elemento a baja velocidad impacta un hueso cualquiera, éste puede reaccionar modificando su forma, inicialmente dentro de límites elásticos, si la carga supera la elasticidad, el hueso continuará deformándose, pero en una fase **plástica** en la que la deformación no puede retornar a su forma original y posteriormente, si la carga tiene suficiente energía, se producirá la fractura.

Cuando la velocidad es alta, el hueso se comporta como un vidrio y no como un material viscoelástico (Symes, L'Abbe, Chapman, Wolff, & Dirkmaat, 2012). En el caso de que la lesión se trate de impacto de proyectil de arma de fuego, se observarán también fracturas radiales y concéntricas, asociadas a los orificios de entrada y salida. La fotografía 4-9 permite ver que las fracturas generadas por impacto de proyectil de arma de fuego también son de tipo radial y concéntrico.

4.4.1 Recorridos frecuentes de fracturas

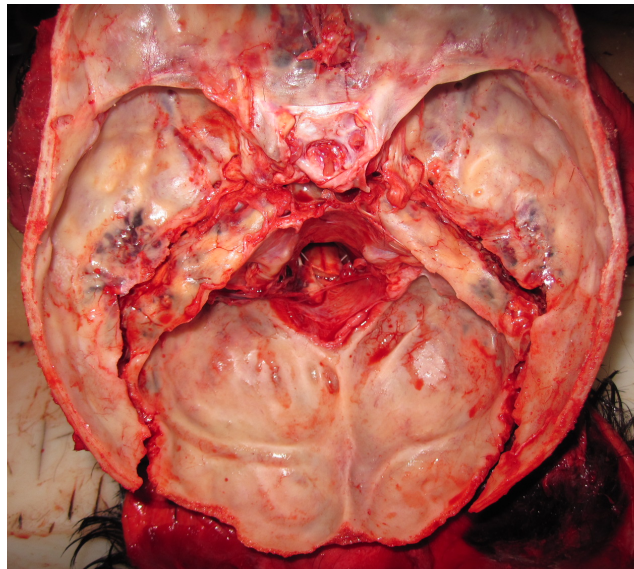
Hardt y Kuttnerberg (2010) describen que si el punto de impacto es en la parte superior y media de la frente, las fracturas se dispersarán, hacia el etmoides y los senos paranasales. Y si compromete la parte baja del frontal, puede ocurrir la separación del esqueleto facial de la bóveda.

Los golpes sobre la línea media dejarán una dispersión de fracturas más o menos simétrica (Fenton, Stefan, Wood, & Sauer, 2005), (Galloway & Wedel, 2014), si son en el rostro, normalmente pueden separar la arcada dental, separar la región orofacial o desprender todo el esqueleto facial.

Cuando los golpes son en la región lateral del rostro comprometen el proceso lateral de las órbitas, pueden separar el arco cigomático, fracturar el ala mayor del esfenoides en la fosa media y extenderse hasta el temporal (Hardt & Kuttentberg, 2010).

Los golpes en la mandíbula pueden transferir la energía a la base del cráneo a través de las cavidades gelnoideas de los temporales, formando fracturas en anillo en el occipital como se observa en la fotografía 4-10. Cuando la carga es suficientemente alta, también se asocian fracturas en las ramas mandibulares y el cuello de los cóndilos, y hasta en la línea media mandibular.

Fotografía 4-10: fractura de forma circunferencial en la fosa posterior del cráneo causada por transmisión de energía, por golpe severo en la línea media mandibular.



Nombre de la fuente: (Campos, Hernández, & Téllez, 2014)

Los golpes en la región lateral de la bóveda, requieren menor carga de energía para fracturarse (Yoganandan & Pintar, 2004), usualmente se extienden hacia la fosa media y pueden llegar hacia la posterior, es muy frecuente que pasen a la región contralateral por la parte anterior de las porciones petrosas de los temporales, formando lo que denomina: **fractura en bisagra.**

Cuando la energía llega, predominantemente en sentido antero posterior o postero anterior las fracturas desde la región lateral de la bóveda se extienden de manera horizontal hacia el frontal, en donde suelen atravesarlo, pasando por la línea de unión entre la parte escamosa del frontal y la parte basal; desde donde pueden alcanzar el ala mayor del esfenoides del lado opuesto y entrar a la fosa media. Si las fracturas se dirigen de forma horizontal al occipital, tienden a descender buscando las fosas cerebelosas y el agujero magno.

Los golpes en la región occipital, dependiendo del ángulo de impacto, pueden enviar fracturas que descienden hasta el agujero magno o los agujeros yugulares; o dirigen las fracturas hacia los parietales o temporales por donde entran a la fosa media.

Es muy difícil que las fracturas que van por la base del cráneo asciendan de una fosa a otra en sentido anteroposterior, es más frecuente que ocurra en el sentido contrario, lo que sí puede ocurrir es que las fracturas que se dispersan por la bóveda de posterior hacia anterior, terminen en fosas más anteriores, usualmente entrando por la escama del temporal o por las alas mayores del esfenoides.

Hay que tener presente que cuando hay varias fracturas radiales, cada una seguirá un recorrido distinto dependiendo de la zona que comprometa, siempre buscando las áreas de menor resistencia.

No es el mecanismo causal el que determina la dirección de las fracturas, sino la dirección del impacto (ya que las fracturas seguirán la trayectoria del golpe; la cantidad de energía de éste, pues cuando más alta es, habrá más segmentos anatómicos involucrados y mayor cantidad de fracturas; cada una tomará un camino diferente y estará condicionada por la presencia de las otras, teniendo en cuenta que una fractura no atraviesa a otra (Berryman & Symes, 1998).

La amplitud de la superficie que impacta el cráneo también condiciona el patrón de las fracturas. Si se trata de un elemento pequeño como un proyectil causará lesiones focalizadas, como la pérdida en los orificios de entrada o salida, las cuales estarán o no asociadas a fracturas concéntricas o radiales dependiendo de la cantidad de energía que lleve el elemento.

Si la superficie es amplia, por ejemplo el piso, en una caída de altura en la que el cráneo impacta con las estructuras del rostro, dicho impacto se dará al tiempo sobre varias protuberancias, generando cada una un patrón de fragmentación propio, que dificultará al investigador entender si se trata de un golpe contra una superficie amplia o varios golpes sobre las eminencias (Campos, Hernández, & Téllez, 2014).

Por último no se debe olvidar que el recorrido de las fracturas está determinado por la morfología del cráneo, que es única en cada individuo, ya que depende de factores como el grosor del tejido, enfermedades, grados de desarrollo muscular, etc..

5. Conclusiones y recomendaciones

Entender la biomecánica del cuerpo, requiere entender primero su Biología (BIO), para después entender la MECÁNICA. Es por ello que este texto, hace énfasis en las características biológicas del cráneo, que pueden servir a futuros antropólogos a comprender cómo éstas determinan la buena parte de las características del trauma óseo.

De este ejercicio se plantean las siguientes conclusiones:

5.1 Conclusiones

La capacidad que tienen los huesos para soportar cargas depende de:

- La proporción de material orgánico / inorgánico que presentan.
- La capacidad que tiene el tejido para remodelarse y alinearse de tal manera que las cargas puedan ser transmitidas fácilmente. Esta capacidad está condicionada por el sistema endocrino, muscular, las células óseas, especialmente los osteocitos.
- La topografía de las estructuras óseas y su relación con otras.
- La edad del individuo, ya que las propiedades físicas de los huesos cambian en las diferentes fases del desarrollo del cuerpo.
- Eventuales patologías que pueden debilitar el tejido óseo o muscular, haciéndolos más débiles para recibir las cargas mecánicas.

Todo esto resalta la necesidad de recordar que pese a que hay características biológicas que comparten todos los seres humanos, cada persona tiene particularidades únicas que deben ser consideradas durante el análisis antropológico de trauma óseo.

Para el cráneo, específicamente, hay que tener en cuenta que, pese a estar compuesto por 22 huesos, debe entenderse como un todo, con dos componentes de particularidades

muy distintas, que están íntimamente relacionados entre sí. Lo que determina que las cargas aplicadas en uno de los componentes, sean transmitidas al otro, depende de si están involucradas las estructuras que comparten, lo que implica:

- Fracturas en la bóveda craneal que alcancen al etmoides serán conducidas al esqueleto facial y viceversa.
- Cargas en las arcadas maxilar y mandibular son fácilmente transmitidas a la bóveda craneal a través del hueso esfenoides y de los cóndilos mandibulares.

El cráneo en conjunto puede compararse con un edificio, que tiene áreas fuertes y ligeras que le permiten resistir grandes cargas, al tiempo que es liviano. Las áreas de reforzamiento son moldeadas durante la vida, a partir de las particularidades individuales, para adaptarse a las diferentes fuerzas a las que está sometido. Las áreas débiles, son el camino potencial por el que las fracturas, producidas por cargas extrínsecas, recorrerán hasta que se disipe por completo la energía que traen consigo.

Aunque los factores intrínsecos como la cantidad de energía de un impacto determinan la magnitud y la ubicación de una lesión, la anatomía y la forma del cráneo determinan los caminos que recorrerán las fracturas.

5.2 Recomendaciones

Para tener una comprensión integral del cuerpo humano, con miras a realizar análisis antropológico forense, se debe entender la relación que existe entre cada uno de los componentes, por lo que se recomienda revisar estas relaciones en cada uno de los segmentos corporales y no sólo en el cráneo.

En este documento se hizo énfasis en la explicación de las relaciones morfológicas del cráneo adulto, debido a que es el que más bibliografía presenta, por lo que se sugiere continuar en la exploración de este tema en individuos infantiles.

Bibliografía

- Bangash, M. Y., Al-Obaid, Y. F., Bangash, F. N., & Bangash, T. (2007). The Human Skull: An Engineering Analysis. In M. Y. Bangash, Y. F. Al-Obaid, F. N. Bangash, & T. Bangash, *Trauma - An Engineering Analysis: With Medical Case Studies Investigation* (pp. 343-350). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Bass, W. (1971). *Human osteology: A laboratory and field manual of the human skeleton*. Missouri: Missouri Archaeological Society.
- Berryman, H., & Symes, S. (1998). Recognizing gunshot and blunt cranial through fracture interpretation. In K. Reichs, & K. Reichs (Ed.), *Forensic Osteology: Advances in the identification of human, Second edition* (pp. 333-352). Springfield, Illinois, USA: Charles C. Thomas Publisher.
- Bonilla, G., Bernardou, M., Castro, F., Paday, M., Rodríguez, J., & Zamborano, P. (2010). Arbotantes craneales: implicancia anatómica en fracturas. *Revista Argentina de Anatomía online*, 1(2), 33-80.
- Boruah, S., Paskoff, G., Schender, B., Subit, D., Salzar, R., & Crandall, J. (2015). Variation of bone layer thickness and trabecular volume fraction in the adult male human calvarium. *Bone*, 77, 120-134.
- Burns, K. (1998). *Forensic anthropology training manual*. New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- Campos V., I. (2014). Consideraciones para el análisis de fracturas óseas: una mirada desde la antropología. In N. Téllez Rodríguez, *Patología Forense - Un enfoque en derechos humanos* (Vol. 1, pp. 613-625). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá).
- Campos V., I. (2014). Introducción al análisis antropológico de lesiones por proyectiles de armas de fuego y explosivos en hueso. In N. Téllez Rodríguez, *Patología Forense - Un enfoque en derechos humanos* (Vol. 2, pp. 133-152). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá).
- Campos, I., Hernández, J., & Téllez, N. (2014). Caídas. In N. Téllez (Ed.), *Patología Forense. Un enfoque centrado en derechos humanos* (Vol. 2, pp. 173-197). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

- Captier, G., Cristol, R., Montoya, P., Prudhomme, M., & Godlewski, G. (2003). Prenatal Organization and Morphogenesis of the Sphenofrontal Suture in Humans. *Cells Tissues Organs*, 175(2), 98-104.
- Chai, Y., & Robert, M. (2006). Recent Advances in Craniofacial Morphogenesis. *DEVELOPMENTAL DYNAMICS*, 235, 2353-2375.
- Cortés, C. C. (2016). Introducción a la biomecánica. In C. Sanabria-Medina, *Patología y antropología forense de la muerte: la investigación científico-judicial de la muerte y la tortura, desde las fosas clandestinas, hasta la audiencia pública* (pp. 687-694). Bogotá D.C.: Forensic Publisher.
- Currey, J. D. (2002). The Mechanical Properties of Materials. In J. D. Currey, *Bones: Structure and Mechanics* (pp. 27-53). Princeton: Princeton University Press.
- Dempster, W. (1967). Correlation of types of corical grain structures with architectural features of the human skull. *Developmental Dynamics*, 120(1), 7-31.
- Di Leva, A., Bruner, E., Haider, T., Rodella, L., Lee, J., Cusimano, M., & Tschabitscher, M. (2014). Skull base embryology: a multidisciplinary review. *Child's Nervous System*, 30, 991-1000.
- Evans, F. G. (1957). *Stress and Strain in Skull Deformation and Fracture*. Illinois: Charles C Thomas Publisher.
- Fenton, T., Stefan, V., Wood, L., & Sauer, N. (2005, Marzo). Symmetrical Fracturing of the skull from midline contact gunshot wounds: Reconstruction of individual death histories from skeletonized human remains. *Journal of Forensic Sciences*, 50(2), 274-285.
- Fernández-Tresguerres Hernández-Gil, I., Alobera Cracia, M., del Canto Pingarrón, M., & Blanco Jerez, L. (2006). Bases fisiológicas de la regeneración ósea II. El proceso de remodelado. *Medicina oral, patología oral, cirugía bucal*, 11, 51-57.
- Fernández-Tresguerres Hernández-Gil, I., Alobera Gracia, M., del Canto Pingarrón, M., & Blanco Jerez, L. (2006). Bases fisiológicas de la regeneración ósea I. Histología y fisiología del tejido óseo. *Medicina oral, patología oral, cirugía bucal*, 11, 47-51.
- Ferré, J., Le Cloarec, A., Chevalier, C., Barbin, J., & Barbin, J. (1988). Biomechanics of the calvarium. *Surgical and Radiological Anatomy*(10), 29-36.
- Frank, H. N. (2004). HEAD AND NECK. In H. N. Frank, *Atlas of Human Anatomy* (pp. 1-144). ICON Learning Systems.

- Galloway, A. (1999). The biomechanics of fracture production. In *Broken Bones: Anthropological Analysis of Blunt Force Trauma*. Springfield, Illinois: Charles C. Thomas Publisher.
- Galloway, A., & Wedel, V. (2014). Bones of the skull, the dentition and osseous structures of the throat. In A. Galloway, & V. Wedel, *Broken bones. Anthropological analysis of blunt force trauma* (pp. 133-160). Charles C. Thomas.
- Gorter, D., Krause, C., Löwik, C., van Bezooijen, R., & ten Dijke, P. (2008). Control of bone mass by sclerostin: Inhibiting BMP - and WNT- induced bone formation. In S. Vukicevic, & K. Sampath (Eds.), *Bone morphogenetic proteins: from local to systemic therapeutics* (pp. 257-276). Verlag Basel, Suiza: Birkhauser.
- Gozna, E. R. (1982). Biomechanic of Long Bone Injuries. In E. R. Gozna, & I. J. Harrington, *Biomechanic Of Musculoskeletal Injury* (pp. 1-29). Baltimore: Williams & Wilkins.
- Gurdjian, E., Webster, J., & Lissner, H. (1953). Observations on prediction of fracture site in head injury. *Radiology*, 60, 226-235.
- Haas, A., Weiglein, A., Faschinger, C., & Müllner, K. (1993). Fetal development of the human orbit. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*(231), 217-220.
- Hardt, N., & Kuttnerberg, J. (2010). Classification of Craniofacial Fractures. In N. Hardt, & J. Kuttnerberg, *Craniofacial trauma*. Springer.
- Harkess, J., Ramsey, W., & Ahmadi, B. (1984). Principles of fractures and dislocations. In C. Rockwood, & D. Green (Eds.), *Fractures in Adults*. Philadelphia: Lippincott Company.
- Hart, G. (2005). Fracture pattern interpretation in the skull: Differentiating blunt force from ballistic trauma using concentric fractures. *Journal of Forensic Sciences*, 1276-1281.
- Hipp, J. A., & Hayes, W. C. (1998). Biomechanics of Fractures. In B. D. Browner, J. B. Jupiter, A. M. Levine, & P. G. Trafton, *Skeletal Trauma: Fractures, Dislocations and Ligamentous Injuries* (2ª edición ed., Vol. 1, pp. 97-129). Philadelphia: W.B. Saunders.
- Högling, H., Barckhaus, E., Krefting, J., Althoff, J., & Quint, P. (1990). Collagen mineralization: Aspects of the structural relationship between collagen and apatitic crystallites. In E. Bonucci, & P. Motta, *Ultrastructure of skeletal tissues. Bone and cartilage in health disease*. Kluwer Academic Publishers.

- Infante, C. (2009). Generalidades del crecimiento y desarrollo craneofacial. In C. Infante, *Fundamentos para la evaluación del crecimiento, desarrollo y función craneofacial* (pp. 1-23). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Kieser, J. (2013). Basic principles of biomechanics. In J. Kieser, M. Taylor, & D. Carr, *Forensic Biomechanics* (pp. 9-33).
- Kimmerle, E., & Baraybar, J. (2008). *Skeletal trauma identification of injuries resulting from human rights abuse and armed conflict*. Boca Raton: CRC Press.
- Klein-Nulend, J., Bacabac, R., & Bakker, A. (2012). Mechanical loading and how it affects bone cells: The role of the osteocyte cytoskeleton in maintaining our skeleton. *European Cells and Materials*, 24, 278-291.
- Knothe Tate, M., Adamson, J., Tami, A., & Bauer, T. (2004). The osteocyte. *The International Journal of Biochemistry*, 36, 1-8.
- Kroman, A. (2007). *Tesis doctoral Fracture Biomechanics of Human Skeleton*. Knoxville: The University of Tennessee,.
- Kroman, A., Kress, T., & Porta, D. (2011). Fracture Propagation in the Human Cranium: A Re-testing of Popular Theories. *Clinical Anatomy*, 24(3), 309-318.
- Kroman, A., Kress, T., & Porta, D. (2011). Fracture Propagation in the Human Cranium: A Re-Testing of Popular Theories. *Clinical Anatomy*, 24, 309-318.
- LeCount, E., & Hockzema, J. (1934). Symmetrical traumatic fractures of the cranium; Symmetrical fragmentation. *Archives of surgery*, 29(2), 171-226.
- Love, J., Derrick, S., & Wieserma, J. (2011). Skull fractures. In J. Love, S. Derrick, & J. Wieserma, *Skeletal atlas of child abuse* (pp. 9-37). Springer.
- Lozano Morales, M., & Nuvan Barrera, L. (2012). Cambios en la base del cráneo y remodelación ósea en pacientes adultos tratados con ortopedia maxilar. *Revista Nacional de Odontología*, 8(14), 9-15.
- Maggiano, C. (2012). Making the mold: a microstructural perspective on bone during growth and mechanical adaptation. In C. Crowder, & S. Stout, *Bone histology: an anthropological perspective* (pp. 45-90). Boca Ratón: CRC Press.
- Mandarim-De-Lacerda, C., & Alves, M. (1992). Growth of the cranial bones in human fetuses (2nd and 3rd semesters). *Surgical Radiologic Anatomy*, 14, 125-129.
- Maples, W. (1986). Trauma analysis by the forensic anthropologist. In K. Reichs (Ed.), *Forensic osteology* (1st ed., pp. 218-228). Springfield, IL.: Charles C. Thomas.

- Marotti, G. (1990). The original contributions of the scanning electron microscope to the knowledge of bone structure. In E. Bonucci, & P. M. Motta (Eds.), *Ultrastructure of skeletal tissues. Bone and cartilage in health and disease* (pp. 19-40). Kluwer Academic Publishers.
- McElhaney, J., Hopper, R., Nightingale, R., & Myers, B. (1995). Mechanism of basilar skull fracture. *Journal of Neurotrauma*, 12(4), 669-678.
- Moore, K. L., Dalley, A. F., & Agur, M. R. (2010). *Clinically Oriented Anatomy*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Moore, K., Dalley, A., & Agur, A. (2010). Cabeza. In K. Moore, A. Dalley, & A. Agur, *Anatomía con orientación clínica* (Sexta Edición ed., pp. 820-980). Lippincott Williams & Wilkins.
- Moritz, A. R. (1954). Mechanical Injuries of the Skeletomuscular System. In A. R. Moritz, *The Pathology of Trauma* (2ª edición ed., pp. 340-390). London: Henry Kimpton.
- Mulargia, S., Dooley, C., Cristofolini, L., & Taylor, D. (2014). Fracture and fatigue in osteocytes. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 39, 231-237.
- Muñoz, J., Liñares- Iglesias, M., Suarez-Peñaranda, J., Mayo, M., Miguéns, X., Rodríguez-Calvo, M., & Concheiro, L. (2001). Stature estimation from radiographically determined long bone length in a Spanish population sample. *Journal of Forensic Sciences*, 46(2), 363-366.
- Noble, B. (2008). The osteocyte lineage. *archives of biochemistry and biophysics*, 473, 106-111.
- Pavelka, M., & Roth, J. (2010). Bone. In M. Pavelka, & J. Roth, *Functional Ultrastructure Atlas of tissue biology and pathology* (Second ed., pp. 296-298). Viena, Austria: Springer.
- Pollock, R. (2012). *Craniomaxillofacial Buttresses. anatomy and operative repair*. Thieme.
- Raghavendra, B., Kanchan, T., Attiku, Y., Dixit, P., & Kotian, M. (2012). Sex estimation from foramen magnum dimensions in an Indian population. *Journal of forensic and Legal Medicine*, 19, 162-167.
- Rogers, L. F. (1992). Skeletal Biomechanics. In W. Blacwell (Ed.), *Radiology of Skeletal Trauma* (Vol. 1, pp. 19-27). New York: Churchill Livingstone.

- Sadler, T. (2012). Cabeza y cuello. In T. Sadler, *Langman Embriología Médica* (pp. 260-286). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Sadler, T. (2012). Esqueleto Axial. In T. Sadler, *Langman Embriología médica* (pp. 133-144). Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins.
- Salter, R. B. (2000). Estructura y función normales de los tejidos musculoesqueléticos. In R. B. Salter, *Trastornos y lesiones del sistema musculoesquelético* (pp. 9-31). Barcelona: Masson.
- Schaffler, M., Cheung, W.-Y., Majeska, R., & Kenedy, O. (2014). Osteocytes: Master Orchestrators of bone. *Calcified Tissue International*, 94(1), 5-24.
- Scheuer, L., Black, S., & Christie, A. (2000). The head, neck and dentition. In L. Scheuer, S. Black, & A. Christie, *Developmental Juvenile Osteology* (pp. 33-170). London: Academic Press.
- Shapiro, R., & Robinson, F. (1976). Embryogenesis of the human occipital bone. *American Journal of Roentgenology*, 126, 1063-1068.
- Sinelnikov, R. D. (1984). *Atlas de Anatomia Humana* (4ª edición ed.). MIR.
- Smith, O., Berryman, H., & Lahren, C. (1987). Cranial fracture patterns and estimate of direction from low velocity gunshot wounds. *Journal of forensic sciences*, 32, 1426-1421.
- Smith, O., Pope, E., & Symes, S. (2009). Look until you see. Identification of trauma in skeletal material. In D. Steadman, *Hard Evidence Case Studies in Forensic Anthropology* (pp. 190-204). New Jersey: Pearson.
- Solano, A. (2006). Las leyes de la ortopedia. *Revista colombiana de ortopedia y traumatología*, 20(4), 115-118.
- Stout, S., & Crowder, C. (2012). Bone remodeling, histomorphology, and histomorphometry. In C. Crowder, & S. Stout, *Bone Histology: an anthropological perspective* (pp. 1-21). Boca Ratón: CRC Press.
- Symes, S. A., L'Abbe, E., Chapman, E., Wolff, I., & Dirkmaat, D. (2012). Interpreting traumatic injury to bone in medicolegal investigations. In *A Companion to Forensic Anthropology* (pp. 340-389).
- Szabo-Rogers, H., Smithers, L., Yakob, W., & Liu, K. (2010). New directions in craniofacial morphogenesis. *Developmental Biology*, 341, 84-94.

- Takeuchi, S., Hirukawa, K., & Togari, A. (2013). Acidosis inhibits mineralization in human osteoblasts. *Calcified Tissue International*, 93, 233-240.
- Tappen, N. (1964). An examination of alternative explanations of split-line orientation in compact bone. *American Journal of physical anthropology*, 22, 423-442.
- Vance, B. (1927). Fractures of the skull. *Archives of surgery*, 14, 1023-1091.
- Vondra, J. (1965). *Fractures of the base of the skull*. Springfield, Illinois: Charles C. Thomas.
- Wescott, D. (2017). Biomechanics of bone trauma. In M. Houck (Ed.), *Forensic Anthropology* (pp. 185-191). Academic Press.
- White, T., & Folkens, P. (2005). *The human bone manual*. Academic Press.
- Yoganandan, N., & Pintar, F. (2004). Biomechanics of temporo-parietal skull fracture. *Clinical Biomechanics*, 19(3), 225-239.