



**Universidad de Concepción**  
**Facultad de Ciencias Sociales**  
**Carrera de Antropología**

**LA SUTURA METÓPICA COMO RASGO EPIGENÉTICO:  
FRECUENCIA Y VARIABILIDAD EN CALOTAS CRANEALES  
PERTENECIENTES A LA COLECCIÓN OSTEOLÓGICA DEL  
DEPARTAMENTO DE ANATOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE  
CONCEPCIÓN**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Sociales de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Antropólogo con mención en Antropología Física.

Por: Juan Pablo Cruz Falcón  
Profesor Guía: Edgar Gaytán

Concepción, Chile, marzo 2026

Dedicado a mi familia, a mis padres, a mis hermanas, mis  
Abuelos, especialmente mi abuelo materno que ya no se  
Encuentra en este mundo, quien desde pequeño me inculcó  
El gusto por esto, que es lo que amo. A mi perro Mike quien  
Siempre se quedaba conmigo mientras redactaba esta investigación.  
Especialmente a mis amigos de la vida y a los que hice  
En la universidad, que sin ellos no hubiera podido llegar  
Hasta acá. Simplemente gracias. Los amo.

## Índice

Introducción .....	1
Capítulo I. Antecedentes de la investigación .....	6
1.1. Antecedentes de investigaciones previas sobre la sutura metópica .....	7
1.2. Contexto nacional del estudio de la sutura metópica .....	13
1.3. Planteamiento del problema .....	15
1.4. Pregunta de investigación e hipótesis .....	17
1.5. Justificación .....	19
1.6. Objetivos .....	20
Capítulo II. Marco teórico .....	24
2.1. Epigenética .....	24
2.2. Evolución humana .....	26
2.3. Suturas craneales y su desarrollo .....	27
2.4. Cierre metópico .....	29
2.5. Morfología y variaciones .....	30
2.6. Etiología .....	32
2.7. Genética .....	33
2.8. Metopismo y antropología física y forense .....	35
Capítulo III. Metodología .....	38
3.1. Tipo y enfoque de la investigación .....	39

3.2. Diseño metodológico .....	39
3.3. Muestra de estudio .....	41
3.4. Variables analizadas .....	42
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	43
3.6. Procedimiento .....	44
3.6.a. Medición morfométrica comparativa entre calotas con y sin metopismo.....	44
3.6.b. Análisis fractal de la sutura metópica .....	51
3.7. Análisis de los datos .....	56
3.8. Consideraciones éticas .....	57
Capitulo IV. Resultados, discusión y conclusiones .....	59
4.1. Resultados .....	60
4.1.a. Frecuencia del metopismo en la muestra .....	60
4.1.b. Variabilidad morfológica de la sutura metópica .....	61
4.1.c. Complejidad morfológica mediante análisis fractal .....	63
4.1.d. Comparación morfométrica entre calotas con y sin metopismo.....	64
4.1.e. Comparación con estudios internacionales .....	66
4.1.f. Potencial aplicación forense del metopismo .....	68
4.2. Discusión .....	69
4.3. Conclusiones .....	73
Bibliografía .....	77

## Índice imágenes, tablas y gráficos

Fig. 1. Imagen de bebé con surco metópico .....	2
Fig. 2. Imagen de cráneos con sutura metópica, vista real y radiológica .....	4
Fig. 3. Imagen de sutura metópica completa desde vista superior .....	7
Fig. 4. Tabla 1 principales teorías históricas del metopismo y su evolución.....	23
Fig. 5. Esquema de 5 autores sobre el metopismo .....	37
Fig. 6. Imagen toma de medida longitud fronto-occipital con tabla osteométrica.....	45
Fig. 7. Imagen toma de medida anchura biparietal con tabla osteométrica .....	45
Fig. 8. Tabla 2 medidas de calotas con metopismo .....	47
Fig. 9. Tabla 3 medidas de calotas sin metopismo .....	48
Fig. 10. Imagen resumen gráfico del análisis de calotas con y sin metopismo.....	50
Fig. 11. Imagen calota metópica utilizada en método Box-Counting .....	53
Fig. 12. Imagen procedimiento detallado de Box-Counting .....	53
Fig. 13. Gráfico resultados obtenidos con el método Box-Counting .....	54
Fig. 14. Tabla 4 (D), (R2) y error estándar de calotas con metopismo .....	55
Fig. 15. Gráfico 1 porcentajes obtenidos en el estudio de calotas con y sin metopismo...	61
Fig. 16. Imagen calota con sutura metópica incompleta .....	62
Fig. 17. Imagen calota con sutura metópica completa .....	63
Fig. 18. Imagen calota con metopismo .....	65
Fig. 19. Imagen calota sin metopismo .....	66
Fig. 20. Gráfico 2 frecuencia del metopismo en estudios internacionales y en Chile .....	67

## Introducción

El estudio de la variabilidad craneal ha ocupado un lugar importante dentro del campo de la antropología física, especialmente en el análisis de rasgos epigenéticos y no métricos, los cuales permiten acercarse a la comprensión de la diversidad biológica humana desde una perspectiva poblacional. Entre estos rasgos, la sutura metópica (también denominada sutura frontal), representa una variante anatómica de especial interés, debido a su persistencia en la vida adulta, fenómeno conocido como metopismo, el cual constituye una expresión morfológica poco frecuente pero significativa dentro del desarrollo craneal humano.

Durante el desarrollo embrionario y los primeros años de vida, la sutura metópica divide el hueso frontal dos mitades, permitiendo la expansión del neurocráneo en sincronía con el crecimiento encefálico (Podstawka et al., 2024). En condiciones normales, esta sutura comienza su proceso de cierre en etapas tempranas de la infancia; sin embargo, en algunos individuos puede persistir parcial o completamente hasta la adultez (Podstawka et al., 2024). Esta variabilidad ha sido documentada en diversas poblaciones alrededor del mundo, con frecuencias que generalmente oscilan entre un 5% y un 10%, aunque con diferencias atribuibles a factores genéticos, ambientales y de desarrollo (Berry & Berry, 1967; Hauser & De Stefano, 1989).



Fig.1. Bebé con surco metópico

Nota. Imagen obtenida de A.D.A.M., Inc. (s.f.).

Históricamente, el metopismo fue objeto de múltiples interpretaciones que hoy se consideran obsoletas, vinculándolo erróneamente con características raciales, criminalidad o supuestas jerarquías evolutivas. Estas explicaciones carecieron de sustento empírico sólido y reflejaron los sesgos científicos de su época. En contraste, los enfoques contemporáneos entienden la persistencia de la sutura metópica como el resultado de complejas interacciones entre mecanismos genéticos, procesos moleculares de osificación y factores biomecánicos asociados al crecimiento craneofacial (Opperman, 2000; Rice et al., 2003). Desde esta perspectiva, el metopismo deja de ser interpretado como una anomalía aislada para ser comprendido como una variante dentro del aspecto normal de la diversidad humana. En el contexto latinoamericano, si bien existen estudios sobre la frecuencia del metopismo en distintas poblaciones, las investigaciones en Chile siguen siendo limitadas, especialmente en colecciones osteológicas contemporáneas. El único antecedente nacional relevante data de fines del siglo XX, lo que evidencia un vacío de información actualizado que permita comparar la población chilena con otras series

internacionales. Esta carencia limita tanto el análisis poblacional comparativo como las posibles aplicaciones del rasgo en el ámbito forense.

La colección osteológica del Departamento de Anatomía de la Universidad de Concepción constituye una oportunidad excepcional para abordar esta problemática. Conformada principalmente por restos humanos datados entre los siglos XIX y XX, esta colección representa una muestra de población chilena contemporánea que hasta la fecha no había sido analizada sistemáticamente en relación con la sutura metópica. Durante el proceso de inventario y análisis preliminar de 248 calotas craneales desarrollado en la práctica profesional en el año 2025 por los estudiantes Juan Pablo Cruz, Adele Hayvel y Brandon Gutiérrez, se identificó la presencia de esta sutura en 14 ejemplares, hallazgo que motivó el desarrollo de la presente investigación.

El análisis de la sutura metópica en esta colección no solo permite establecer su frecuencia dentro de una muestra chilena contemporánea, sino que también descubrir su variabilidad morfológica (ya sea completa o incompleta, en V, doble u otras configuraciones irregulares) aportando información relevante para la caracterización intra e interpoblacional. Asimismo, la incorporación de enfoques complementarios, como el análisis morfológico detallado y la dimensión fractal de la sutura, contribuye a profundizar la comprensión de su complejidad morfológica y estructural. Desde una perspectiva aplicada, el estudio del metopismo posee implicancias directas en la antropología forense y en el ámbito médico. En contextos forenses, los rasgos epigenéticos pueden aportar información valiosa, ya que en el caso de la sutura metópica, al ser un rasgo morfológico individualizante, puede ser una herramienta útil para la identificación personal mediante la comparación de cráneos con radiografías previas al fallecimiento (Pakdeewong & Tonho, 2019).

En el ámbito clínico, el desconocimiento de esta variante anatómica puede llevar a confusiones diagnósticas, ya que múltiples trabajos subrayan que la sutura metópica persistente puede simular una fractura frontal vertical en radiografías y TC en traumatismos craneales (Pakdeewong & Tonho, 2019). Por ello, generar datos sistemáticos a nivel nacional no solo amplía el conocimiento antropológico, sino que también fortalece su aplicación práctica.



Fig. 2. Cráneos con sutura metópica, vista completa, incompleta y radiológica. Imagen de elaboración propia

Bajo este contexto, la presente investigación tiene como objetivo general analizar la frecuencia y variabilidad morfológica de la sutura metópica en una muestra de calotas craneales pertenecientes a la colección osteológica del Departamento de Anatomía de la Universidad de Concepción. A partir de este objetivo, se busca documentar la presencia del rasgo, clasificar sus variantes morfológicas, contrastar los resultados con investigaciones internacionales y explorar su potencial utilidad en el ámbito forense

chileno. Esta investigación se enmarca en la necesidad de actualizar y ampliar el conocimiento sobre la variabilidad craneal en poblaciones chilenas contemporáneas, contribuyendo a llenar un vacío existente en la literatura nacional, para comprender este rasgo epigenético desde una perspectiva anatómica, genética, evolutiva y aplicada para lograr integrar enfoques clásicos y contemporáneos de la antropología biológica, consolidando un marco de referencia que articula investigación básica y proyección práctica.

## I. Capítulo Antecedentes de la Investigación

El metopismo es un rasgo epigenético (o no métrico) el cual es bastante fácil de identificar, ya que tiene la particularidad de dividir el hueso frontal en dos porciones que, en la mayoría de los casos, son proporcionales. La sutura metópica o también llamada sutura frontal, corresponde a la articulación que une los dos huesos frontales en la línea media del cráneo durante la infancia, permitiendo el crecimiento del neurocráneo; generalmente comienza a cerrarse hacia los 2 años de edad y suele estar fusionada alrededor de los 8 años, pero también puede persistir en algunos adultos como una variante anatómica (Scheuer & Black, 2000; Standring, 2016) que se extiende desde los puntos craneométricos Nasion (Na) hasta Bregma (Br); además, también puede ocurrir el cierre precoz de esta sutura lo que se conoce como sinostosis metópica. Esta variabilidad en el cierre de la sutura ha sido motivo de interés tanto en el campo de la anatomía como en el campo de la antropología física, ya que puede brindar información sobre los procesos de desarrollo embrionario, del crecimiento, de las diferencias poblacionales e incluso servir de apoyo en contextos forenses, además de tener distintos tamaños, variaciones y grados de cierre.

Dentro del campo de la Antropología física, esta sutura es considerada como un rasgo epigenético, es decir, una característica anatómica no métrica que refleja variaciones hereditarias, pero también influenciadas por factores genéticos o ambientales. Los rasgos epigenéticos son bastante útiles en estudios poblacionales, ya que permiten analizar la variabilidad intra e interpoblacional y, en algunos casos, logran establecer relaciones biológicas entre grupos humanos (Berry & Berry, 1967; Hauser & De Stefano, 1989). En

ese caso, la presencia de la sutura metópica aporta datos relevantes para comprender patrones de diversidad biológica en poblaciones contemporáneas pasadas.

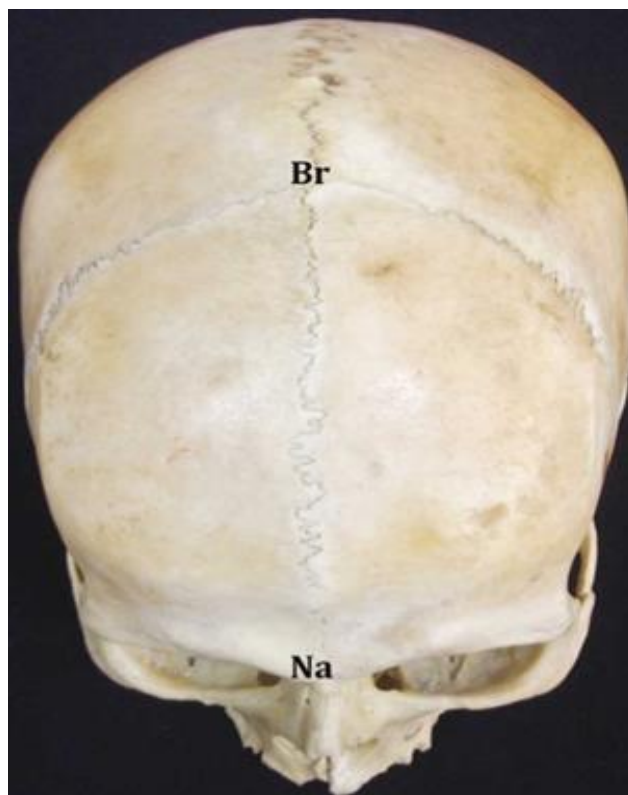


Fig. 3. Sutura metópica completa observada en vista superior del cráneo.

Nota. Imagen obtenida de "Metopismo: Bases morfológicas, implicancias clínicas y reporte de caso", por I. Roa, J. I. Moraga, y M. Cantín, 2011, *International Journal of Morphology*, 29(3), 992-999.

### 1.1. Antecedentes de investigaciones previas sobre la sutura metópica

La frecuencia de la sutura metópica en etapa adulta ha sido ampliamente estudiada a nivel mundial en las últimas décadas, estudiando su frecuencia y variabilidad morfológica en diversas poblaciones alrededor del mundo, encontrándose prevalencias que varían entre

un 5 y un 10% en la mayoría de las poblaciones, aunque algunos grupos presentan valores más altos o bajos dependiendo de factores genéticos, geográficos y ambientales (Ajmani et al., 1983; Sánchez-Lara et al., 2015). En India, Shah et al. (2011) analizaron 100 cráneos adultos y reportaron una frecuencia del 8% con predominio de suturas metópicas incompletas. De manera similar, Ajmani et al. (1983) registraron un 9.5% en población nigeriana, observando variaciones en la morfología y disposición del rasgo. En Brasil, Castilho et al. (2006) describieron un 7.2% de metopismo en una muestra de 69 cráneos del sur del país, con predominio de formas lineales. Por su parte, Murlimanju et al. (2011) hallaron una frecuencia del 7.4% en cráneos de población india, reforzando la idea de que los valores globales son relativamente consistentes.

En el continente europeo, estudios de Skrzat, Walocha y Zawilinski (2004) en Polonia y de Nakatani, Tanaka, Mizukami y Shiraishi (1998) en Japón también confirman esta tendencia, con frecuencias de 6.5% y 8.1% respectivamente. Sin embargo, en América Latina, las investigaciones continúan siendo escasas. En México, Comas (1943) encontró una frecuencia cercana al 7%, mientras que, del Sol, Olave y Prates (1989) reportaron un 6,2% en población chilena del siglo XX, aunque sin especificar el origen regional de las muestras. Estos resultados permiten inferir que la frecuencia del metopismo presenta una estabilidad relativa entre distintas poblaciones humanas, pero su morfología puede variar ampliamente dependiendo de la composición genética y de los factores ambientales propios de cada grupo humano (Hauser & De Stefano, 1989). No obstante, las investigaciones latinoamericanas siguen siendo limitadas y con escasa representación de colecciones osteológicas contemporáneas, lo cual sustenta la necesidad de estudios actualizados que amplíen el conocimiento sobre este rasgo en contextos locales. En población chilena, la presencia de la sutura metópica en cráneos adultos ha sido documentada en estudios morfológicos realizados sobre colecciones osteológicas. Investigaciones publicadas en la revista *International Journal of Morphology* han analizado cráneos de individuos adultos con el objetivo de describir variaciones

anatómicas de la bóveda craneana y de la línea media frontal, pero sin llegar a un resultado concluyente que pueda aportar datos a la literatura chilena con respecto al metopismo.

Si se remonta a la historia de la humanidad, los primeros registros y evidencia precisa que se tiene sobre el metopismo en la historia de la humanidad datan del siglo I a.C. en la obra de Celso, donde el autor dice: ‘ ‘ una cuarta sutura que parte de la punta, parte la cabeza en dos y se dirige hacia la frente, terminando a veces arriba de la frente; partiéndola en dos en otras ocasiones y viene a terminar entre las dos cejas’’. Gui de Chauliac (1342-1370), Vesalio (1514-1564), Ambrosio Paré (1517-1590) Falopio (1523-1562), Rahuino (1550-1624), Eustaquio (1574-), Riolo (1577-1657), Disdier (1767), Soemmerring (1755-1830), son los médicos y anatómicos que más han estudiado la presencia de la sutura metópica en adultos, además de aludir a la presencia de esta en sus obras clásicas; pero aun así según sus diferentes opiniones no lograron asignarle un mayor porcentaje de frecuencia al género masculino o femenino. Según los autores mencionados anteriormente, el metopismo puede ser producido por diversas causas de distinta procedencia, las cuales hasta la actualidad no son válidas como explicaciones concluyentes:

#### 1. Criminalidad y locura

Cesare Lombroso y su escuela, a finales del siglo XIX, sostenían que el metopismo era más frecuente en delincuentes y personas con trastornos mentales. Se encontraron datos variados con respecto a esta teoría; por ejemplo, solo un 10% de los cráneos de criminales y entre 2.3% y 18% en personas con trastornos mentales presentan metopismo, porcentajes que no son lo suficientemente altos para sostener una relación causal; por lo que los estudios muestran mucha variabilidad y falta de evidencia clara.

## 2. El metopismo es más frecuente en poblaciones humanas ancestrales

Giovanni Canestrini (1867) creía que el metopismo era más común en razas ‘primitivas’, pero esta idea se basó en muestras muy pequeñas y poco representativas (3 cráneos ligures); las estadísticas actuales muestran que el porcentaje de metopismo es menor en razas consideradas primitivas y en cráneos prehistóricos, lo cual contradice en lo absoluto esta hipótesis.

## 3. Estenocrotafia, Plagiocefalia y Escanocefalia

Rudolf Virchow, a mediados del siglo XIX, postulaba que estas deformaciones craneales eran la causa del metopismo, pero no existen pruebas objetivas ni estadísticas consistentes que apoyen una relación entre estas condiciones y la presencia de la sutura metópica; además de que la presencia de metopismo en cráneos con este tipo de deformaciones son bajas.

## 4. El metopismo es más común en poblaciones humanas superiores – Evolución progresiva

Anutschine, durante la segunda mitad del siglo XIX, sostenía que el metopismo era un signo de evolución progresiva, el cual era mucho más común en grupos intelectualmente superiores; pero, aunque algunos autores han observado correlaciones con ciertos caracteres craneales y rasgos intelectuales, no se tiene evidencia clara para afirmar que el metopismo sea un fenómeno evolutivo universal o ligado a la superioridad intelectual.

## 5. Debido a la deformación craneana artificial

Gaspar, a finales del siglo XIX, sostenía que la deformación intencional del cráneo contribuiría a la conservación de la sutura metópica, pero las series estadísticas son muy

pequeñas, contradictorias o con poco valor estadístico; en muchos casos, los cráneos deformados no presentan un porcentaje mayor de metopismo que los normales, salvo una excepción de cráneos bolivianos con un 20%, lo cual no es un porcentaje suficiente para poder generalizar.

#### 6. Braquicefalia o tendencia a la braquicefalización

Thurman, a mediados del siglo XIX, postula que la braquicefalia favorece la aparición del metopismo, pero existen datos contradictorios; ya que algunos estudios muestran más casos de metopismo en cráneos braquicéfalos, otros en doliocéfalos o no encuentran relación clara. Por otro lado, en poblaciones con altos niveles de braquicefalia el porcentaje de metopismo es bajo, lo cual lo deja como una causa inválida; por lo que no se puede considerar la braquicefalia como la causa del metopismo, sino como un posible efecto o coincidencia.

#### 7. Disminución de la presión muscular temporal

Lodewijk Bolk (1917) en esta teoría indica que la menor presión de los músculos temporales impediría el cierre de la sutura metópica, pero se argumenta que la acción de estos músculos podría no ser centrípeta y que, en mamíferos inferiores con musculatura fuerte, la sutura metópica persiste normalmente. También, la mayor potencia muscular ocurre en la adultez, después del cierre normal de la sutura, lo que es opuesto a la hipótesis; por lo que esta teoría es bastante cuestionada y considerada inválida.

#### 8. La disminución de la presión del aparato masticador

Maslovsky (1926) creía que al tener menor presión en el aparato masticador (debido a la disminución de la robustez en humanos más civilizados) provocaba en metopismo, y aunque esta teoría explicaría el aumento del metopismo en grupos civilizados, no hay

evidencia clara ni suficiente de estudios profundos para confirmar esta relación, por lo que es una hipótesis interesante pero aún requiere de confirmación.

#### 9. Presión centrífuga del cerebro

Papillault (1896) indica que, al tener mayor masa y presión cerebral, se impediría la osificación de la sutura metópica; pero los estudios demuestran que la capacidad craneal en individuos con metópicos no es mayor de forma consistente respecto a los no metópicos. Incluso existen casos con capacidades aun menores o extremadamente altas dentro de los metópicos, lo cual impide establecer una relación entre el metopismo con la presión cerebral.

#### 10. Disfunción endocrina

Papillault (1928) en rectificación de su teoría anterior, creía que las alteraciones hormonales, principalmente el hipotimismo, producían anomalías en la osificación, provocando la persistencia de la sutura metópica; pero no hay suficientes casos ni estudios concluyentes que permitan confirmar esta causa, ya que algunos autores cuestionan la relación con la sutura metópica y con el retraso en el cierre de otras suturas, por lo que esta posible causa sigue siendo incierta.

#### 11. Factores hereditarios

Sullivan (1920) postula que el metopismo es un rasgo genético relacionado con la composición según la población específica, el cual es transmitido hereditariamente; pero no hay contradicciones fuertes en las estadísticas de diferentes grupos raciales y geográficos (por ejemplo, porcentajes muy dispares entre mexicanos y europeos), lo cual es un impedimento al momento de aceptar contundentemente esta explicación; por lo que se requieren estudios genéticos y osteológicos más amplios.

También existen otras teorías (presión de la hoz cerebral, infantilismo, anomalía regresiva, combinación de presiones) donde hay diversas explicaciones adicionales, como la menor presión de la hoz cerebral impidió la osificación normal; el metopismo como característica del infantilismo o anomalía regresiva; y la combinación de la presión cerebral con la presión muscular, pero ninguna de estas explicaciones aporta pruebas sólidas ni las observaciones suficientes. Varias de ellas se basan en suposiciones sin evidencia o con resultados contradictorios, además de no encontrar una explicación satisfactoria para la ocurrencia de este fenómeno.

Con las teorías anteriores se puede asumir que ninguna hipótesis presenta las suficientes pruebas científicas para poder ser validada como una posible causa del metopismo por sí sola; siendo las más probables (pero no confirmadas) la teoría genética heredo-específica y la teoría de la disminución de la presión del aparato masticador, aun así, se siguen requiriendo investigaciones más amplias que den resultados representativos para poder generalizar y aceptar su validación.

## 1.2. Contexto nacional del estudio de la sutura metópica

En Chile, los estudios osteológicos se han enfocado principalmente en contextos arqueológicos, especialmente en poblaciones prehispánicas del norte y el centro del país, donde se ha investigado la variabilidad craneal, la deformación cefálica y otros rasgos epigenéticos asociados a la filiación biológica (Cunha, 2006; Buikstra & Ubelaker, 1994). Sin embargo, las investigaciones sobre la sutura metópica en muestras contemporáneas son prácticamente inexistentes. El único estudio conocido sobre el metopismo en cráneos chilenos corresponde a del Sol et al. (1989), quienes analizaron 64 cráneos adultos de la Universidad Austral de Chile, hallando una frecuencia del 6.2%. Desde entonces, no se

han reportado publicaciones científicas que actualicen estos valores ni que integren el análisis de la sutura metópica en colecciones osteológicas contemporáneas.

La colección osteológica del Departamento de Anatomía de la Universidad de Concepción se comenzó a raíz de la labor del Servicio Médico Legal, ya que hasta el año 1960 aproximadamente estuvo ubicado en lo que hoy es el Departamento de Anatomía, en donde a través de cuerpos no reclamados, proporcionaba material anatómico a la Facultad de Medicina de la Universidad de Concepción, los cuales eran exclusivamente para uso de docentes y uso de investigaciones que se realizaban en el departamento de Anatomía.

Como se puede encontrar en la página web de la Universidad de Concepción, en la sección del Museo de Anatomía: "Todas las muestras contenidas en este museo son anteriores de 1960. En estos tiempos y antes ... era frecuente que la Universidad recibiera, desde el Hospital o el servicio médico legal, los cuerpos que no eran reclamados...", por lo que se puede asumir que los ejemplares pertenecientes a la colección osteológica datan del siglo XIX al siglo XX. Desde entonces, las donaciones posteriores a esos años han sido principalmente voluntarias mediante declaración notarial, y no provienen del Servicio Médico Legal. Hasta la fecha no existen datos concretos ni registros que puedan indicar a quien correspondían los restos humanos, ni de donde procedían, por lo que el único dato del que se puede tener certeza sobre la colección osteológica es que pertenecen a una población chilena.

El primer acercamiento que se tuvo a esta colección osteológica fue en el segundo semestre universitario del año 2024, en donde se realizó una pre-práctica profesional cuyo objetivo fue realizar un inventario considerando todas las piezas óseas que se encontraban en esta colección, ya que previamente nunca se había realizado esta tarea, además de no tener ningún tipo de registro acerca de la cantidad de ejemplares por cada tipo que había

en esta colección. Finalizado el proceso de pre-práctica, se dio paso a la práctica profesional, en donde mientras se realizaba el análisis específico de cada ejemplar se notó que había una sutura extra en algunas calotas, que, siendo un total de 248 calotas, 14 de ellas presentaban esta particular variante anatómica; por lo cual nació un gran interés sobre querer averiguar más acerca de este fenómeno.

### 1.3. Planteamiento del problema

En Latinoamérica se han desarrollado múltiples investigaciones sobre la frecuencia de este rasgo no métrico en poblaciones prehispánicas y mestizas, sin embargo, en Chile los estudios con respecto a este tema siguen siendo escasos y generalmente centrados en contextos bioarqueológicos, dejando de lado las colecciones osteológicas contemporáneas.

La necesidad de investigar acerca de esta temática surge a raíz de la escasez de investigaciones en colecciones osteológicas contemporáneas en Chile, en donde, además de constituir una limitación importante, dificulta en gran manera la generación de datos actualizados que puedan ser comparativos con otros grupos latinoamericanos y con las tendencias globales descritas en la literatura, además de también ser una limitación para la incorporación del metopismo en estudios forenses. Por otro lado, estudios contemporáneos han resaltado la importancia de evaluar su frecuencia y variabilidad en distintas poblaciones, ya que, además de constituir un rasgo epigenético de relevancia antropológica, puede contribuir en la estimación de filiación biológica, en la identificación de restos humanos y en la diferenciación de patrones morfológicos asociados a factores genéticos y ambientales (Shah et al., 2011; Braga & Ríos, 2019).

Por otro lado, las interpretaciones históricas atribuyeron el metopismo a causas que hoy en día resultan obsoletas como algunas de las causas o teorías mencionadas anteriormente -como la criminalidad, la locura o supuestas diferencias raciales (Comas, 1943)-, lo que refuerza la necesidad de generar evidencia científica moderna que considere factores genéticos, ambientales y de desarrollo que influyen en su persistencia (Shah, Rathod, Patel, & Gohil, 2011; Braga & Ríos, 2019). Ante la presente situación, el problema de investigación radica en la carencia de estudios sistemáticos sobre la frecuencia y variabilidad de la sutura metópica en poblaciones chilenas contemporáneas, lo cual limita su potencial aplicación en la antropología forense y en el análisis de la diversidad biológica. Además, la prevalencia de la sutura metópica puede confundirse con fracturas en imágenes radiológicas y tomografías, lo que genera implicancias diagnósticas importantes en medicina y neurocirugía (Murlimanju et al. 2011), donde se debe tener los conocimientos previos para poder proceder en intervenciones quirúrgicas cuando las imágenes de estos tipos arrojan que el individuo posee metopismo, ya que la confusión diagnóstica puede traer consecuencias significativas, especialmente en contextos de urgencia médica o en procedimientos neuroquirúrgicos, donde cualquier error en la interpretación radiológica podría derivar en las decisiones clínicas incorrectas.

En el ámbito de la bioarqueología, en donde se tienen restos humanos antiguos, el metopismo aporta información sobre patrones de desarrollo y sobre prácticas culturales como la deformación craneana, que han sido vinculadas a la variabilidad en el cierre de suturas (Cunha, 2006), lo cual permite comprender dinámicas biológicas y sociales de comunidades antiguas; además del estudio de suturas craneales (en donde también se incluye a la sutura metópica) las cuales permiten evaluar los patrones de maduración ósea en poblaciones antiguas, aportando información sobre la salud, nutrición y procesos de crecimiento (Buikstra & Ubelaker, 1994), por lo que llenar este vacío de conocimiento, podría evaluar los cambios temporales y espaciales la frecuencia y morfología del

metopismo, además de poder llevar un análisis sobre continuidad o variación poblacional en el transcurso del tiempo.

#### 1.4. Pregunta de investigación e hipótesis

El estudio de los rasgos epigenéticos como la sutura metópica, permite el acercamiento a la comprensión de la diversidad biológica y cultural de las poblaciones humanas; tal como se mencionó en los antecedentes, la sutura metópica es una característica no métrica que puede persistir en la vida adulta como variante anatómica mostrando una frecuencia poblacional que fluctúa según factores genéticos, ambientales y de desarrollo (Berry & Berry, 1967; Hauser & De Stefano, 1989). El hallazgo de las 15 calotas con sutura metópica no solo evidencia la presencia de este rasgo epigenético en una muestra osteológica chilena contemporánea, sino que también produce la necesidad de analizar y caracterizar su frecuencia y variabilidad en mayor detalle, considerando su importancia tanto en la antropología física como en la medicina y otras áreas del conocimiento. Frente a esta situación, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿A qué factores se encuentra asociada la presencia del metopismo, y que variaciones en su forma puede llegar a tener?, ¿Es similar en otras poblaciones al rededor del mundo?.

Esta pregunta dirige la investigación hacia dos dimensiones importantes, primero, la descripción cuantitativa de la frecuencia del metopismo en la colección actualizada; y segundo, la evaluación cualitativa de la variabilidad morfológica de esta sutura, considerando factores como la extensión de esta (si es completa o incompleta), su localización y las posibles asociaciones con otros rasgos craneales.

De acuerdo con la revisión bibliográfica y las observaciones previas durante el análisis de la colección osteológica, se puede establecer como hipótesis general que la sutura metópica presenta una frecuencia cercana a la reportada en estudios de poblaciones internacionales (5-10%), pero con una variabilidad morfológica propia de esta colección, la cual puede estar influenciada por tanto por factores genéticos como ambientales en el cierre de esta sutura. De la hipótesis general se pueden desprender algunas hipótesis específicas como lo son:

1. La frecuencia del metopismo presente en la colección se aproxima al rango descrito en la literatura mundial (5-10%).

Aunque también puede presentar particularidades debido al origen histórico de los ejemplares, ya que pertenecen a una población chilena urbana de los siglos XIX y XX.

2. La variabilidad morfológica de la sutura metópica se presentará en distintos patrones (completos e incompletos).

De acuerdo con lo planteado por Scheuer y Black (2000) y Standring (2016), quienes señalan que esta sutura puede persistir en diferentes grados y extensiones.

3. El análisis de este rasgo permitirá aportar datos relevantes para la antropología física y forense en Chile.

Considerando que la escasez de investigaciones con respecto a este tema en colecciones contemporáneas limita su aplicación en la identificación de restos humanos en contextos forenses y en estudios poblacionales comparativos (Shah et al., 2011; Braga y Ríos, 2019).

## 1.5. Justificación

El planteamiento de esta hipótesis se puede sustentar y justificar en tres ejes esenciales para esta investigación. En primer lugar, el eje comparativo, ya que la frecuencia de metopismo encontrada en la colección osteológica podrá compararse con los rangos de metopismo descritos en otras poblaciones del mundo, lo que dará paso a identificar posibles similitudes y diferencias. En segundo lugar, el eje morfológico, ya que la descripción de las variantes de la sutura metópica en la colección osteológica aportará en ampliar la base de datos osteológicas y conocimiento que se tiene acerca de este rasgo epigenético en Chile; y por último, el eje aplicado, teniendo en cuenta que en diversos ámbitos tanto en la medicina como en la antropología física y forense, la persistencia de esta sutura implica bastantes desafíos ya sea en los diagnósticos médicos o en identificaciones forenses, lo cual radica en la importancia de generar estudios sistemáticos a nivel nacional (Murlimanju et al., 2011).

Se destaca la importancia de someter el hallazgo a un análisis sistemático, ya que solo constatar su existencia no es suficiente para poder establecer una conclusión general sobre su frecuencia ni variabilidad morfológica; ya que los rasgos epigenéticos son útiles siempre que se disponga de un registro detallado y cuantitativo de su distribución (Hauser & De Stefano, 1989). Por otro lado, la gran diversidad de teorías históricas que intentaron explicar las posibles causas de la persistencia de la sutura metópica hasta la adultez, que hoy se reconocen como inválidas o erróneas (Comas, 1943), requieren de un enfoque científico actualizado para lograr dejar atrás las especulaciones, y reemplazarlas por evidencia empírica basada en la observación sistemática y en el análisis de una colección osteológica de esta magnitud, con una gran representación como el caso de la colección osteológica del Departamento de Anatomía de la Universidad de Concepción.

## 1.6. Objetivos

En la actualidad, los análisis osteológicos contemporáneos no solo intentan buscar la existencia o ausencia de diversos rasgos morfológicos, sino que también investigan acerca de su valor como indicadores de diversidad biológica, historia poblacional, y aplicaciones prácticas en el ámbito forense (Sierp & Hanneberg, 2015). La relevancia de establecer objetivos claros en esta investigación se centra en que la sutura metópica, al ser una variante anatómica poco estudiada y analizada en colecciones osteológicas chilenas contemporáneas, puede aportar nueva evidencia que complemente los estudios bioarqueológicos realizados en contextos prehispánicos. También contribuye a la elaboración de marcos referenciales nacionales que en muchas ocasiones son necesarios en procesos de identificación humana y diagnósticos clínicos, en donde el metopismo genera confusión con traumatismos craneales (Lattanzi et al., 2017).

Los objetivos de la investigación no solo quieren tener un interés descriptivo, sino también comparativo y aplicado donde, de este modo, los datos que se generen podrán vincularse y compararse con estudios previos de otras regiones del mundo, permitiendo la evaluación sobre la medida en que las poblaciones chilenas se acercan o se distancian de las tendencias mundiales. Por otro lado, los objetivos buscan resaltar la importancia sobre la utilidad de los rasgos epigenéticos en el ámbito forense, donde su valor radica en la posibilidad de aportar a la estimación de afinidad biológica o al descarte de hipótesis en procesos de identificación (Osborne, Simmons, & Nawrocki, 2014). Bajo este contexto, se definen los siguientes objetivos de investigación:

Objetivo general: Analizar la frecuencia y variabilidad morfológica de la sutura metópica en una muestra de calotas craneales de población contemporánea chilena.

Objetivos específicos:

1. Documentar la presencia de la sutura metópica en la colección osteológica estudiada.

Este registro permitirá construir un primer referente cuantitativo para la población chilena contemporánea, además de también ser un primer referente cualitativo ya que se describirán las variaciones morfológicas que tendrá la sutura metópica dentro de la colección osteológica estudiada; lo cual representa un aporte de gran valor para poder ser comparado con datos internacionales existentes.

2. Identificar y clasificar las variantes morfológicas de la sutura metópica (completa, parcial y formas irregulares).

La descripción detallada de los patrones morfológicos con respecto al metopismo permitirá enriquecer el conocimiento sobre la variabilidad intra e interpoblacional, aspecto que ha sido subrayado en estudios recientes de antropología biológica (Hershkovitz et al., 2019).

3. Contrastar la frecuencia del metopismo obtenida con investigaciones realizadas en otras poblaciones contemporáneas.

Este objetivo busca situar los resultados de la muestra chilena dentro de un marco comparativo amplio, fortaleciendo la discusión acerca de los factores genéticos, ambientales y culturales que pueden influir en la persistencia de la sutura metópica, ya que esta alteración muestra distintas presentaciones e incidencias según el grupo étnico estudiado (Roa et al., 2011).

4. Explorar la utilidad de la sutura metópica como marcador epigenético en el ámbito forense chileno.

Evaluar su potencial aplicación permitirá establecer de qué manera este rasgo epigenético puede contribuir a la identificación de restos óseos humanos y a la diferenciación de perfiles biológicos, siendo un aporte adicional a la práctica forense chilena.

Con todos los objetivos mencionados anteriormente, se busca caracterizar en que frecuencia se da este fenómeno y las posibles variantes que puede tener la colección analizada, además de poder generar un marco de referencia nacional el cual permita articular y conectar hallazgos osteológicos con aplicaciones comparativas y prácticas útiles dentro del ámbito de la antropología forense.

Los antecedentes revisados permiten conocer que la sutura metópica ha sido objeto de numerosas teorías históricas y estudios anatómicos, pero aún existen vacíos de información respecto a su frecuencia y variabilidad en poblaciones chilenas contemporáneas. Si bien las investigaciones internacionales han consolidado rangos de frecuencia entre el 5% y el 10%, en Chile no se han desarrollado estudios recientes que actualicen estos valores ni que consideren las particularidades del contexto nacional. La revisión también demuestra que las explicaciones históricas sobre las causas del metopismo (asociadas a factores raciales, patológicos o sociales) carecen de fundamento científico y han sido reemplazadas por interpretaciones modernas basadas en genética, biomecánica y desarrollo craneal (Manzanares, Goret-Nicaise & Dhem, 1988; Opperman, 2000; Rice et al., 2003).

Tabla comparativa de teorías históricas sobre el metopismo

Autor / Época	Teoría propuesta	Causa sugerida	Validez actual
Cesare Lombroso (s.XIX)	Metopismo asociado a criminalidad y locura	Rasgo más frecuente en delincuentes	Inválida: sin evidencia estadística
Giovanni Canestrini (1867)	Mayor frecuencia en ‘razas primitivas’	Factor racial evolutivo	Inválida: sesgo muestral y racismo científico
Rudolf Virchow (s.XIX)	Deformaciones craneanas (estenocrotafia, plagiocefalia)	Causa mecánica del metopismo	No comprobada: sin correlación estadística
Anutschine (s.XIX)	Síntoma de evolución progresiva	Rasgo de ‘razas superiores’	Obsoleta: carente de base biológica
Gaspar (s.XIX)	Deformación craneana artificial	Mantenimiento de la sutura	Poco consistente: escasa evidencia
Thurman (s.XIX)	Braquicefalia favorece el metopismo	Forma craneal condicionante	Inconclusa: resultados contradictorios
Lodewijk Bolk (1917)	Disminución de presión muscular temporal	Falta de cierre sutural	Cuestionada: sin relación causal demostrada
Maslovsky (1926)	Disminución del aparato masticador	Reducción de presión ósea	Parcialmente válida: posible influencia ambiental
Papillault (1896-1928)	Presión cerebral o disfunción endocrina	Hipotiroidismo y masa encefálica	No confirmada: evidencia insuficiente
Sullivan (1920)	Factores heredo-específicos	Transmisión genética del rasgo	Más aceptada: requiere estudios genéticos amplios

Fig. 4. Tabla número 1, elaboración propia, principales teorías históricas del metopismo y su evaluación contemporánea.

## Capítulo II. Marco teórico

En este capítulo se revisan los aspectos anatómicos, embriológicos, morfológicos, y genéticos de la sutura metópica, además de conocer la formación y comportamiento de esta para comprender su variabilidad entre individuos, poblaciones, y lograr establecer una base de conocimientos sólida.

### 2.1. Epigenética

Dentro de la antropología biológica, los rasgos epigenéticos o no métricos corresponden a variaciones morfológicas discretas del ser humano que no dependen directamente del tamaño o de la proporción de los huesos, sino que depende netamente de las diferencias en la estructura que han sido heredables, las cuales están influenciadas por factores genéticos y ambientales (Berry & Berry, 1967). Estos rasgos, incluyen la sutura metópica, los huesos wormianos, el foramen supraorbitario, o el foramen parietal accesorio, entre otros; rasgos los cuales al igual que la sutura metópica, exhiben una expresión heredable y una distribución poblacional específica (Hauser y De Stefano, 1989). Mientras que rasgos como los huesos wormianos se asocian más con la plasticidad craneal y las condiciones biomecánicas del parto (Hauser y De Stefano, 1989), la sutura metópica refleja principalmente el equilibrio entre la osificación y la resorción osteoclástica durante la infancia (Manzanares, Goret-Nicaise, & Dhem, 1988). Estos rasgos se consideran de gran utilidad para poder estudiar la variabilidad biológica dentro y entre poblaciones

humanas alrededor del mundo entero (Hauser & De Stefano, 1989). A diferencia de los rasgos métricos, que se cuantifican mediante medidas lineales, los rasgos epigenéticos se registran de manera cualitativa (presencia o ausencia), pero aun así poseen un alto valor comparativo en estudios poblacionales, bioarqueológicos y forenses (Sierp & Hanneberg, 2015). Su análisis permite identificar relaciones de afinidad biológica entre grupos humanos, contribuyendo a la reconstrucción de la historia poblacional y al entendimiento del complejo proceso de migración y mezcla genética que se ha desarrollado a lo largo de la historia de la humanidad (Braga & Ríos, 2019). Bajo este contexto, la sutura metópica se inscribe como un rasgo epigenético craneal relevante, donde su estudio aporta datos sobre patrones de desarrollo y herencia que complementan la información métrica tradicional.

Es importante aclarar que cuando se habla de rasgos epigenéticos, no se habla únicamente de ‘‘marcas’’ superficiales en los huesos, sino que también se habla de procesos biológicos que modulan cómo se expresa el genoma sin cambiar la secuencia de ADN. En tejidos óseos, mecanismos como la regulación epigenética (por ejemplo, cambios en la actividad de factores de transcripción y señales moleculares que regulan osteoblastos y osteoclastos) influyen en si una sutura permanece permeable o se osifica prematuramente (Berry & Berry, 1967; Hauser & De Stefano, 1989). En otras palabras, la expresión de los rasgos epigenéticos resulta de la interacción entre la herencia genética y señales ambientales que regulan la actividad celular; esa visión molecular y de interacción gene-ambiente es la que los rasgos epigenéticos sean útiles en estudios poblacionales: no son ‘‘definitivos’’ como un gen único, pero si reflejan tendencias biológicas que se transmiten y varían entre poblaciones (Hauser & De Stefano, 1989), por lo que se puede decir que es un rasgo epigenético del desarrollo óseo.

## 2.2. Evolución humana

Desde una perspectiva evolutiva, la sutura metópica, línea media del hueso frontal, constituye un rasgo craneal clave que ha variado a lo largo de la historia de los primates y del género homo, la cual ayuda a entender la evolución craneal del género homo. En especies no humanas, como los chimpancés y gorilas, la sutura frontal suele fusionarse de manera más temprana, mientras que en los humanos tiende a mantenerse abierta por más tiempo, lo que permite un mayor desarrollo cerebral durante la infancia (Lieberman, 2011). Esta tardía persistencia se interpreta como una adaptación al incremento encefálico neonatal y al ‘‘dilema obstétrico’’ de parir cráneos más voluminosos en el género homo (Falk et al., 2012) lo que requiere un equilibrio entre un canal de parto estrecho y un cerebro en expansión (Lieberman, 2011). Lieberman (2011) enfatiza que la morfología craneal exclusiva de los humanos modernos (con globalización del neurocráneo) surge de cambios tempranos en la base craneal ligados al crecimiento de los lóbulos frontales y temporales, además facilitó una etapa posnatal larga de encefalización y plasticidad craneofacial, lo que a su vez permitió cambios morfológicos asociados a comportamiento y capacidad cognitiva (Lieberman, 2011; Bastir & Rosas, 2016).

Estudios recientes de integración craneofacial indican además que estos cambios se inscriben en patrones asociados a la encefalización y a la reducción del tamaño corporal en el género homo (Bastir y Rosas, 2016). Rice et al. (2003) señalan que el desarrollo calvarial está regulado genéticamente: mutaciones en genes como FGFR o MSX provocan cierres suturales prematuros, lo que subraya el valor adaptativo de retrasar el cierre metópico para acomodar correctamente el cerebro en crecimiento. En consecuencia, la evolución craneal humana logra establecer un marco funcional por el cual la variación sutural (incluido el metopismo) es interpretable y comparable entre poblaciones humanas y primates.

### 2.3. Suturas craneales y su desarrollo

Las suturas craneales son uniones fibrosas formadas por tejido conectivo que mantienen unidos los huesos del cráneo. Estas articulaciones permiten el crecimiento del cráneo durante la infancia y actúan como zonas de expansión ósea para acompañar el desarrollo del cerebro (Geneser, 2007). Además, ayudan a absorber las tensiones mecánicas que se producen durante el parto o por el crecimiento encefálico (Watzek et al., 1982). Existen distintos tipos de suturas, como las dentadas, las escamosas y las planas, las cuales se diferencian según la forma de sus bordes (Standring, 2016). En general, las suturas permanecen abiertas durante los primeros años de vida y comienzan a cerrarse cuando el crecimiento craneal termina; sin embargo, existen algunas excepciones.

La sutura metópica, que divide el hueso frontal, cumple una función muy importante, ya que permite que ambos hemisferios frontales se desarrollen de manera equilibrada y protege al encéfalo durante las primeras etapas del desarrollo humano (Gray, 1988; Moore & Persaud, 2002). El cierre de las suturas craneales es un proceso dinámico que depende del equilibrio entre la actividad osteoblástica (formadora de hueso) y osteoclástica (resortiva), influido por las tensiones mecánicas del cráneo y las presiones generadas por el crecimiento encefálico (Opperman, 2000). Desde un punto de vista biomecánico, la sutura metópica actúa como la zona flexible que amortigua las tensiones derivadas del crecimiento cerebral y las contracciones musculares de la región frontal (Rice et al., 2003). La tensión mecánica que actúa sobre las suturas se considera un estímulo esencial para mantenerlas abiertas durante la infancia, ya que las fuerzas de tracción provocadas por el crecimiento del encéfalo estimulan la resorción osteoclástica (Manzanares et al., 1998). Considerando lo anterior, el proceso de osificación sutural se encuentra estrechamente regulado tanto por la actividad celular como por los factores mecánicos y hormonales que interactúan en el desarrollo craneofacial normal (Rice et al., 2003).

Durante el desarrollo fetal y en los primeros años de vida, los huesos planos que forman la bóveda craneal se encuentran totalmente unidos, sino que están separados por membranas de tejido conectivo denso que constituyen las suturas (Moore & Persaud, 2002). Estas estructuras cumplen un papel esencial, ya que permiten que los huesos acompañen el crecimiento del encéfalo tanto en la etapa intrauterina como en la infancia temprana. La permanencia de estas suturas durante los primeros años es indispensable para que el cráneo pueda expandirse de manera adecuada, garantizando así un desarrollo normal de la bóveda craneal (Watzek et al., 1982).

La sutura metópica, también conocida como sutura frontal comienza a formarse hacia el final del segundo mes de gestación, localizándose entre los dos centros de osificación del hueso frontal (Gray, 1988; Ajmani et al., 1983). Se considera una prolongación anterior de la sutura sagital (Skrzat et al., 2004). Su proceso de fusión se inicia en la región del nasion y progresa hacia arriba de manera gradual, finalizando en la fontanela anterior en etapas más avanzadas de la niñez (Weinzweig et al., 2003). No existe consenso en la literatura sobre la edad precisa en la que se completa el cierre de esta sutura. Algunos estudios señalan que ocurre entre el primer y el segundo año de vida (Keith, 1948; Manzanares et al., 1988), mientras que otros lo sitúan entre los cinco y seis años (Romanes, 1972; Ajmani et al.), entre los seis y ocho años (Ajmani et al.) o incluso entre los seis y diez años (del Sol et al., 1989). También se ha documentado que, en ciertos casos, la sutura puede mantenerse abierta hasta la adultez, cerrándose más tardía que otras suturas, e incluso persistiendo en individuos de edad avanzada (Nakatani et al., 1998). Cuando la sutura metópica permanece totalmente abierta en la adultez, se denomina metopismo (Madeira, 1995).

## 2.4. Cierre metópico

El cierre de la sutura metópica comienza en la región nasal aproximadamente en la semana 16 de gestación, desplazándose hacia la fontanela anterior, alcanzando esta zona hacia la semana 28. Para la semana 32 ya se observa un cierre aparente en la región supranasal, proceso que continúa hacia la fontanela anterior, indicando que la fusión de sutura puede evidenciarse durante el tercer trimestre de gestación. Chaoui et al. (2005) corroboraron estos resultados, señalando que alrededor de la semana 32 la sutura comienza a cerrarse de la glabella y progresa hacia la fontanela anterior. El mismo patrón también ha sido registrado en fetos con trisomía 21. En estos casos, la ausencia de huesos nasales, producto de alteraciones en la migración o en la función de las células de la cresta neural, no interfiere en el desarrollo de los huesos frontales ni en el cierre de la sutura metópica, ya que la deficiencia afecta exhaustivamente a la deformación de los huesos nasales (Faro et al., 2006).

Tradicionalmente, se ha considerado que el cierre fisiológico de la sutura metópica se completa entre el primer y el segundo año de vida (Keith, 1948; Manzanares et al., 1988; Cohen, 1993), aunque algunos autores señalan que puede prolongarse hasta entre el sexto y décimo año sin que ello se considere anómalo (del Sol et al., 1989). Sin embargo, estudios recientes realizados mediante reconstrucción tridimensional por tomografía computarizada en 159 lactantes con una edad promedio de 27,1 meses revelaron que el 33% de los casos presentaba cierre completo a los 3 meses, el 60% a los 5 meses y el resto de los casos a los 9 meses. En todos los niños evaluados, la sutura metópica mostraba un cierre total, sin evidencia de permeabilidad en la línea sutural entre la glabella y la fontanela anterior (Vu et al., 2001).

El cierre de las suturas craneales no depende exclusivamente de factores genéticos; también está influido por condiciones ambientales, nutricionales y endocrinas. Deficiencias de calcio o vitamina D, así como alteraciones hormonales como el hipotiroidismo o el hipopituitarismo, pueden afectar el ritmo normal de osificación, produciendo retrasos en el cierre sutural o incluso su persistencia (Cohen, 1993). Weinzweig et al., (2003) sostienen que las condiciones de salud materna durante el embarazo y el desarrollo infantil temprano son determinantes en la formación craneal, ya que cualquier alteración metabólica o deficiencia nutricional puede modificar la actividad osteoblástica. Rice, Rice y Thesleff (2013) complementan esta idea al indicar que los procesos moleculares implicados en la formación de suturas responden también a señales externas, como el estrés fisiológico o las condiciones del entorno.

Desde el punto de vista histológico, las suturas (incluida la sutura metópica) están compuestas por tejido conectivo denso rico en fibras colágenas (Moore & Persaud, 2002; Geneser, 2007), el cual posteriormente es reemplazado por tejido tipo coronoide (Manzanares et al., 1988).

## 2.5. Morfología y variaciones

En cuanto a la morfología, en las fases iniciales del espacio correspondiente a la sutura está conformado principalmente por tejido fibroso y células mesenquimáticas, las cuales cumplen la función de favorecer el crecimiento posterior de la estructura (Manzanares et al., 1988).

Faro et al. (2005) realizaron un nuevo estudio sobre el desarrollo de la sutura metópica en fetos utilizando técnicas de ecografía tridimensional, evidenciando que este proceso se

inicia de manera muy temprana. Según sus observaciones, la sutura puede ya visualizarse a la semana 11 de gestación, ubicada entre los huesos frontales en osificación, donde se distinguen rasgos descritos como ‘‘cejas gruesas’’. Entre las semanas 11 y 20, la osificación progresa en dirección superior con un patrón radial. En la zona donde se produce el avance de la osificación, el hueso recién formado se presenta de forma irregular y trabeculada, extendiéndose desde el plano endocraneal hacia el exocraneal, alcanzando la línea media en la región nasal y posteriormente avanzando hacia la futura fontanela anterior.

En el artículo de Roa, Moraga y Cantín (2011) sobre las bases morfológicas del metopismo, se menciona un análisis llevado a cabo por Skrzat et al. (2004) donde analizaron los patrones morfológicos macroscópicos de la sutura metópica; se observó que, en condiciones normales, esta sutura presenta un trayecto con ondulaciones, aunque en la región superior del hueso frontal puede adoptar formas más complejas. En dicho estudio se determinó que la longitud promedio de la sutura alcanza los 123,1 mm (DE= 5,307) y que la dimensión fractal media corresponde a 1,17 mm (DE= 0,076). Asimismo, la observación directa de sus características morfológicas mostró variaciones notables en el recorrido de la sutura desde el nasion hasta el bregma. La comparación de los valores de dimensión fractal muestra que la complejidad de la sutura se duplica al contrastar su porción anterior, que finaliza en el nasion (DF= 1,10), con la parte posterior, que se origina en el bregma (DF= 1,21) (Skrzat et al., 2004).

La sutura metópica ha sido objeto de diferentes sistemas de clasificación en función de su disposición y morfología. De esta forma, puede presentarse como completa o incompleta. La forma de esta sutura puede variar bastante entre personas y poblaciones distintas, se denomina completa cuando se extiende de manera continua desde el nasion hasta el bregma; mientras que es incompleta cuando se proyecta desde el nasion hasta distintos puntos del hueso frontal, sin alcanzar el bregma. Dentro de esta última categoría, se han

descrito subtipos como la lineal, caracterizada por una única traza poco profunda; en V, cuando se observa una bifurcación; y la doble, independiente de su punto de origen (Agarwal et al., 1979; Ajmani et al., 1983). En un estudio realizado en cráneos del sur de Brasil, Castilho et al. (2006) identificaron que el 69,57% de las suturas metópicas correspondían al tipo lineal, el 17,39% al tipo en V, y el 13,04% al tipo doble.

Otros autores han descrito formas adicionales de suturas metópicas incompletas, como las de tipo N, H y U (Agarwal et al., 1979; Ajmani et al., 1983; del Sol et al., 1989). Agarwal et al. (1979), por ejemplo, documentaron variaciones en la parte inferior del hueso frontal en el 35,27% de los casos analizados. En cuanto a su localización, reportaron incidencias del 0,8% en la región superior, media superior, y media inferior del hueso frontal, todas con una disposición lineal. Además, señalaron variantes menos frecuentes, como la forma en Y invertida (0,63%) y en disposición radiada tipo H (0,31%). Como ya se sabe, la frecuencia del metopismo cambia según la población, en estudios realizados alrededor del mundo, en algunas regiones de Sudamérica y África su porcentaje de desarrollo es entre 5% y 10%, pero aun así puede variar dependiendo de factores genéticos y ambientales propios de cada grupo humano (Castilho et al., 2006; Ajmani et al., 1983).

## 2.6. Etiología

En el artículo de Roa, Moraga y Cantín (2011) sobre las bases morfológicas del metopismo, se menciona que según lo planteado por del Sol et al. (1989), entre las posibles causas del metopismo se encuentran el crecimiento anómalo de los huesos de la bóveda craneal, así como la presencia de patologías como la hidrocefalia o la interrupción en los procesos normales del crecimiento. Sin embargo, luego de tantos estudios realizados en busca de su origen, en la actualidad la hipótesis más aceptada es la que atribuye un origen

genético a esta condición (Castilho et al., 2006). También se han considerado otros factores como la influencia del sexo, causas mecánicas presentes durante la vida embrionaria y alteraciones de tipo hormonal. Diversos estudios han descrito que la morfología de la sutura metópica presenta una notable y muy evidente complejidad. Algunas evidencias experimentales sugieren que dicha morfología se encuentra influenciada por fuerzas extrínsecas (Berry & Berry, 1967), y que los factores ambientales desempeñan un papel esencial en el desarrollo morfológico normal, tal como se ha demostrado en estudios de trasplante realizados en ratas (Berry & Berry, 1967; Hauser et al., 1991). No obstante, en la actualidad se reconoce que el desarrollo craneofacial normal depende principalmente de la interacción precisa entre los tejidos derivados de la cresta neural y el mesodermo paraxial, regulada por la acción de genes específicos. Una alteración en cualquiera de estos niveles de control puede provocar un cierre prematuro de las suturas (craneosinostosis) o en un retraso en dicho proceso, conocido como metopismo (Opperman, 2000; Rice et al., 2003; Sahar et al., 2005).

## 2.7. Genética

Se ha identificado que al menos cuatro genes distintos se asocian con estas condiciones: los receptores del factor de crecimiento de fibroblastos (FGFRs), los factores de transcripción MSX2 y TWIST, la fibrilina-1 y el Sox9, los cuales desempeñan funciones clave en la diferenciación y en la proliferación celular (Sahar et al., 2005; Rice et al., 2003). Este último cumple un rol fundamental como regulador de la condrogénesis y presenta una marcada expresión durante las etapas iniciales del cierre sutural. Experimentalmente, se ha observado que la disminución de Sox9 por haploinsuficiencia en tejidos derivados de la cresta neural provoca un retraso en el cierre de la sutura frontal, lo que evidencia su papel esencial en el proceso de osificación entre los huesos frontales (Sahar et al., 2005). Además, la asociación de Sox9 con la correcta transición de la matriz

de tejido conectivo (rica en fibras colágenas) hacia tejido condroide resalta su importancia en el cierre adecuado de la sutura metópica. De manera complementaria, Longaker (2001) señaló que ciertas citocinas presentan una mayor expresión durante la fusión activa de las suturas craneales, mientras que el mantenimiento del estado sutural abierto se relaciona con procesos de resorción osteoclástica (Manzanares et al., 1998).

La resorción osteoclástica tiene un rol fundamental en el desarrollo y mantenimiento de las suturas craneales, incluida la sutura metópica, ya que este proceso consiste en la eliminación controlada del tejido óseo por parte de los osteoclastos; lo que permite que las suturas permanezcan abiertas durante el crecimiento del cráneo y el cerebro. En la sutura metópica, esta actividad evita un cierre prematuro, ya que mantiene la flexibilidad y separación entre los huesos frontales hasta que el desarrollo craneal está completo (Manzanares et al., 1998; Opperman, 2000). Cuando este equilibrio entre resorción y formación ósea se altera (por ejemplo, si disminuye la actividad osteoclástica o aumenta la formación ósea antes de tiempo) pueden aparecer alteraciones como la craneosinostosis o el metopismo, dependiendo de si la sutura se cierra demasiado pronto o permanece abierta más tiempo del normal (Rice et al., 2003; Sahar et al., 2005).

Asimismo, distintas patologías han sido relacionadas con el metopismo en la actualidad. Entre ellas se mencionan la estenocrotafia, caracterizada por un estrechamiento anormal de la región temporal del cráneo; la plagiocefalia anterior, que corresponde al cierre unilateral de las suturas coronales y que clínicamente se manifiesta como una deformidad bifrontal, dificultando la sinostosis del hueso frontal (Portillo et al., 2004); y la escafocefalia, en la cual el cráneo presenta una proyección anterior que le otorga una forma similar a la quilla de un barco (Castilho et al., 2006).

## 2.8. Metopismo y antropología física y forense

La persistencia de la sutura metópica en la adultez no solo representa una variación anatómica, sino también un marcador epigenético con implicancias en la antropología física y forense. En términos antropológicos, la frecuencia del metopismo permite observar diferencias genéticas y ambientales entre poblaciones, ya que su incidencia puede variar según el origen geográfico y las condiciones de desarrollo (Hauser & De Stefano, 1989; Shah et al., 2011).

Distinguir entre una sutura metópica persistente y una fractura craneal es fundamental en el campo de la medicina y la antropología forense, ya que incluso puede tender a confundirse con una fractura vertical o incluso con la sutura sagital (del Sol et al., 1989; Bademci et al., 2007; Keats, 1996; Ajmani et al., 1983). A diferencia de una fractura, la sutura metópica presenta bordes irregulares, dentados y con un grado de esclerosis que indica remodelación ósea antigua (Das et al., 2005). En cambio, las fracturas recientes muestran líneas más definidas y márgenes sin remodelar (aunque depende del tiempo que tenga la fractura). Por esta razón, el diagnóstico debe desarrollarse con un especial cuidado ya que estudios radiográficos han demostrado que una radiografía anteroposterior es suficiente para identificar la sutura metópica y diferenciarla de una fractura (Bademci et al., 2004). Por otro lado, el uso de tecnología y técnicas avanzadas como la TC 3D, ofrecen una visión más precisa que las radiografías simples y evita errores diagnósticos en pacientes traumatizados (Bademci et al., 2007; Celebiler et al., 2007). Asimismo, la presencia de esta condición tiene relevancia quirúrgica, especialmente en procedimientos de reconstrucción craneal o craneoplastías. En pacientes con displasia cleidocraneal, por ejemplo, la falta de fusión de los huesos frontales puede generar preocupación estética y dificultades en la planificación quirúrgica debido a la persistencia de la sutura metópica (McGuire et al., 2007). También, en la actualidad se ha implementado el uso de métodos

morfométricos, los cuales miden la forma y el tamaño de la sutura, además del uso de técnicas histológicas para analizar su estructura a nivel microscópico (Bademci et al., 2007; Skrzat et al., 2004; Manzanares et al., 1988).

Osborne, Simmons y Nawrocki (2014) destacan que los rasgos epigenéticos pueden complementar otros indicadores biológicos durante los procesos de identificación humana, especialmente cuando el esqueleto se encuentra fragmentado o incompleto; por otro lado, estos autores, destacan que la observación de variaciones no métricas contribuye a fortalecer la identificación individual cuando otros parámetros (sexo, edad o estatura) no están disponibles o son insuficientes para lograr una correcta identificación. De la misma manera, Rogers (2017) enfatiza que la variación esquelética constituye una herramienta poderosa en la reconstrucción de perfiles biológicos, dado que aporta información sobre la diversidad poblacional y las tendencias evolutivas; por lo que se puede asumir, que el metopismo adquiere relevancia práctica al contribuir tanto al estudio de la variabilidad humana como a la identificación forense.

La sutura metópica representa un punto de convergencia entre los aspectos anatómicos, evolutivos y genéticos del ser humano; en donde su variabilidad responde a la interacción de factores biológicos y ambientales, y su estudio permite comprender tanto la evolución craneal del género homo como los procesos ontogénicos que determinan la forma y el desarrollo del cráneo humano (Lieberman, 2011; Bastir & Rosas, 2016). La evidencia disponible muestra que el cierre de esta sutura es el resultado de un equilibrio dinámico entre la formación y resorción ósea, regulado por mecanismos moleculares precisos y modulado por condiciones externas como la nutrición y la actividad mecánica (Rice et al., 2003; Cohen, 1993). A nivel poblacional, las diferencias en la frecuencia y la morfología del metopismo revelan la diversidad biológica y la historia evolutiva de las poblaciones humanas (Berry & Berry, 1967; Hauser & De Stefano, 1989). Se puede decir que la sutura metópica no solo constituye un rasgo anatómico o epigenético, sino que también se

considera como un rasgo evolutivo y funcional que contribuye al entendimiento integral del desarrollo humano, y a la aplicación de la antropología física en contextos forenses, médicos y bioarqueológicos (Braga & Ríos, 2019; Osborne et al., 2014).

### Factores que influyen en el cierre y persistencia de la sutura metópica

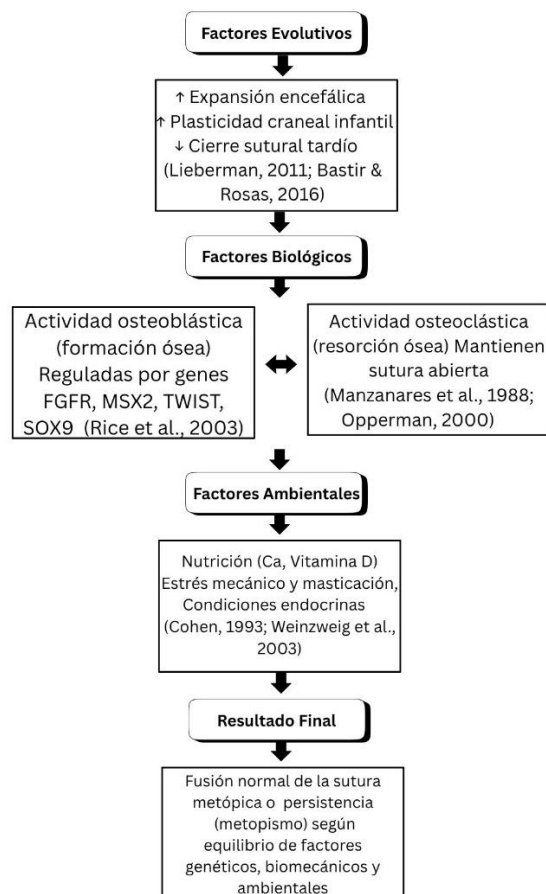


Fig. 5. Fuente de elaboración propia basada en Manzanares et al., (1988), Opperman (2000), Rice et al., (2003), Lieberman (2011), Bastir & Rosas (2016), y Cohen (1993).

### Capítulo III. Metodología

En este capítulo se describe detalladamente el enfoque metodológico empleado para el desarrollo de esta investigación, la cual tuvo como objetivo analizar la frecuencia y la variabilidad morfológica de la sutura metópica en una muestra de calotas craneales pertenecientes a la colección osteológica del Departamento de Anatomía de la Universidad de Concepción. La metodología constituye una parte esencial del proceso científico, ya que permite establecer las bases y procedimientos que garantizan validez, objetividad y reproducibilidad de los resultados obtenidos (Hernández-Sampieri, Fernández & Baptista, 2014). En este apartado se exponen los aspectos relacionados con el tipo y diseño de la investigación, la descripción de la muestra, las variables consideradas, las técnicas de recolección de datos y el procedimiento seguido durante el análisis osteológico de los ejemplares.

El diseño adoptado por esta investigación responde a un enfoque cuantitativo, descriptivo y no experimental, centrado en la observación directa de los ejemplares sin manipulación de variables. A través de la aplicación de criterios sistemáticos de registro y clasificación, se busca documentar de manera precisa la presencia y las variaciones morfológicas de la sutura metópica, proporcionando información comparable con investigaciones previas realizadas en otras poblaciones alrededor del mundo.

### 3.1. Tipo y enfoque de la investigación

La presente investigación corresponde a un estudio cuantitativo, descriptivo y transversal, de carácter no experimental. El estudio se centra en la observación directa de un rasgo anatómico epigenético (la sutura metópica) en una colección osteológica contemporánea chilena, con el objetivo de registrar su frecuencia y variabilidad morfológica. Según Hernández-Sampieri, Fernández y Baptista (2014), las investigaciones descriptivas buscan especificar las propiedades, características y perfiles de fenómenos o poblaciones, sin establecer relaciones causales entre variables. En el caso de esta investigación, se orienta a describir la presencia y variaciones morfológicas de la sutura metópica en la muestra estudiada, sin intervenir los elementos observados. Desde el punto de vista disciplinario, el estudio se enmarca dentro de la antropología física y específicamente de la antropología biológica, considerando que el estudio y análisis de rasgos epigenéticos craneales constituye una herramienta útil para la comprensión de la variabilidad biológica humana (Hauser & De Stefano, 1989; Braga & Ríos, 2019).

### 3.2. Diseño metodológico

El diseño metodológico de esta investigación se estructuró de manera sistemática para garantizar la obtención de datos precisos, reproducibles y comparables respecto a la presencia y morfología de la sutura metópica. Se organizó en tres fases principales: recolección, registro y análisis de la información osteológica, siguiendo criterios propios de la antropología física.

En la primera fase, correspondiente a la observación directa, se procedió a la selección y revisión de las calotas pertenecientes a la colección osteológica del Departamento de Anatomía de la Universidad de Concepción. Cada ejemplar fue examinado individualmente en condiciones controladas de iluminación, limpieza y manipulación, asegurando la preservación del material. Se identificó la presencia de metopismo, su extensión anatómica y su morfología general, empleando los puntos craneométricos nasion y bregma como referencia.

Durante la segunda fase, se realizó el registro sistemático de los datos mediante una ficha osteológica diseñada para el estudio, en la que se consignaron las características observadas: tipo de sutura, grado de cierre, extensión, patrón morfológico, dimensión fractal y observaciones complementarias. Paralelamente, se efectuaron mediciones craneales lineales y de circunferencia, además de análisis de box-counting, con el fin de disponer de parámetros cuantitativos que permitieran contrastar las dimensiones y diferencias entre calotas.

La tercera fase correspondió al procesamiento y análisis de datos, tanto cualitativos como cuantitativos. Los registros se realizaron en planillas electrónicas para su ordenamiento, verificación y posterior análisis descriptivo. Se calcularon frecuencias absolutas y relativas de las diferentes morfologías de la sutura metópica, así como promedios de las medidas craneales, de este modo, se buscó establecer relaciones y posibles patrones morfológicos vinculados con la persistencia del metopismo.

Este diseño metodológico permitió articular la observación anatómica directa con el análisis morfométrico, integrando ambas dimensiones en un mismo proceso investigativo, ya que la secuencia de trabajo observación - registro - análisis asegura la validez de los

resultados y brinda una base sólida para la interpretación de las variaciones anatómicas observadas.

### 3.3. Muestra de estudio

La muestra analizada está compuesta por un total de 248 calotas craneales pertenecientes a la colección osteológica del Departamento de Anatomía de la Universidad de Concepción. Esta colección se conformó principalmente a partir de restos humanos provenientes de cuerpos no reclamados entre los siglos XIX y XX, según se indica en los antecedentes institucionales de la Universidad. Todas las piezas corresponden a individuos adultos sin distinción de sexo estimado.

Criterios de inclusión:

- ✓ Calotas craneales completas o con la región frontal íntegra
- ✓ Buen estado de conservación que permita la observación de la línea sutural estudiada

Criterios de exclusión:

- ✓ Calotas fragmentadas, con pérdida de la región frontal o con daños que impidan la identificación de la sutura
- ✓ Piezas con reparaciones o alteraciones post mortem que dificulten la observación anatómica

La selección final se realizó únicamente los ejemplares que cumplían con las condiciones necesarias para el registro visual del área frontal.

### 3.4. Variables analizadas

Las variables analizadas en la investigación se orientaron a describir la presencia y variabilidad morfológica de la sutura metópica dentro de la muestra osteológica. La variable principal corresponde a la presencia de la sutura metópica, registrada de manera dicotómica según su existencia o ausencia en cada calota craneal observada. Entre las variables secundarias, se incluyó la morfología de la sutura, considerando su clasificación en completa o incompleta, y dentro de esta última, las formas lineales, en V, doble o irregular, siguiendo los criterios propuestos por Ajmani et al. (1983) y Castilho et al. (2006).

Asimismo, se registró la localización anatómica de la sutura en relación con los puntos craneométricos Nasion (Na) y Bregma (Br), con el fin de determinar su extensión y recorrido dentro del hueso frontal. Para complementar esta última variable mencionada, se agregó el número fractal de cada calota, aplicando el método de Box-Counting para poder contemplar el grado de complejidad morfológica de cada sutura analizada. Todas las variables son de naturaleza cualitativa y fueron anotadas en una ficha osteológica elaborada especialmente para esta investigación.

### 3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la obtención de los datos se emplearon instrumentos básicos de medición y registro osteológico, garantizando precisión y estandarización de los valores obtenidos. Las mediciones lineales de las calotas craneales se realizaron utilizando una tabla osteométrica para las longitudes fronto-occipital y biparietal, y una cinta métrica flexible milimetrada para el registro de la circunferencia craneal. El registro de la presencia, morfología y extensión de la sutura metópica se efectuó de forma macroscópica, bajo iluminación natural y sin empleo de material óptico especializado.

El análisis se realizó aprovechando las condiciones de iluminación de la sala designada para continuar la investigación y utilizando guantes de nitrilo para la manipulación de las piezas. Las observaciones fueron registradas en una ficha de registro osteológico adaptada al manual de Buikstra y Ubelaker (1994), donde se consignó la presencia de la sutura metópica, su extensión y la morfología del ejemplar. Para asegurar la fiabilidad de los datos, todas las mediciones fueron realizadas dos veces en distintos momentos, comparando los valores obtenidos para detectar posibles inconsistencias. En los casos que se registraron discrepancias mayores a 0,2 cm entre mediciones, se efectuó una tercera verificación y se adoptó el promedio de las 3 mediciones como valor definitivo obtenido.

De forma paralela se llevó a cabo un registro digital en una planilla electrónica formato Word la cual permitió el control cruzado con las fichas físicas y la identificación de posibles errores de transcripción. Para garantizar la objetividad de la observación morfológica, las piezas fueron analizadas siguiendo los criterios estandarizados de Ajmani et al. (1983) y Castilho et al. (2003), los cuales describen las formas y patrones de la sutura metópica en cráneos adultos; procedimiento el cual asegura la constancia interna y la reproducibilidad de los datos obtenidos.

### 3.6. Procedimiento

El proceso metodológico se desarrolló de manera sistemática a partir de la revisión completa de la colección osteológica del Departamento de Anatomía de la Universidad de Concepción. En primer lugar, se efectuó una inspección general de las calotas craneales con el propósito de evaluar su estado de conservación y determinar cuales cumplían con las condiciones necesarias para su análisis. Posteriormente se seleccionaron aquellas piezas que presentaban la región frontal íntegra, ya que esta zona es indispensable para la observación de la sutura metópica. Una vez seleccionada la muestra, se procedió a la identificación anatómica del hueso frontal, ubicando la línea media comprendida entre los puntos craneométricos nasion y bregma. La observación de las calotas se realizó de manera macroscópica, a simple vista, registrando cuidadosamente la presencia de la sutura metópica y describiendo sus características morfológicas según los criterios establecidos por Ajmani et al. (1983) y Castilho et al. (2006). Los datos obtenidos se consignaron en fichas de registro osteológico y en una planilla de trabajo digital, donde cada ejemplar tiene su propio código de identificación.

#### 3.6.a. Medición morfométrica comparativa de calotas con y sin metopismo

Además del registro cualitativo de la presencia y morfología de la sutura metópica, se efectuó un análisis morfométrico comparativo entre 14 calotas con metopismo y 20 calotas sin metopismo seleccionadas aleatoriamente pertenecientes a la misma colección. Se midieron 3 parámetros craneales: longitud fronto-occipital, anchura biparietal (ambas utilizando una tabla osteométrica), y circunferencia craneal (utilizando una cinta métrica flexible con precisión milimétrica).



Fig. 6. Toma de medida de la longitud fronto-occipital utilizando tabla osteométrica



Fig. 7. Toma de medida de la anchura biparietal utilizando tabla osteométrica

Al comparar las medidas craneales entre ambos grupos de calotas, se observó que las calotas con metopismo presentan, en promedio, una mayor longitud fronto-occipital y una circunferencia ligeramente superior, mientras que la longitud biparietal se mantiene similar en ambos grupos. Estos resultados sugieren que el metopismo podría asociarse a un patrón morfológico caracterizado por una tendencia hacia cráneos más alargados y de mayor perímetro, posiblemente como consecuencia de un crecimiento compensatorio en el eje anteroposterior debido a la persistencia de la sutura metópica. Por el contrario, las calotas sin metopismo tienden a mostrar proporciones más compactas, compatibles con una fusión temporal temprana y una morfología craneal más globular.

Medidas de calotas CON metopismo

Número de calota	Medida frontal-occipital (CM)	Medida parietal izquierdo-parietal derecho (CM)	Circunferencia (CM)
I1-15	16.2	13.3	48.2
I2-16	17.7	13	48.5
J1-26	17.8	13	51.1
I2-07	18.5	13.9	53.5
J1-35	16.5	12.8	48.9
J1-14	17.4	13.9	51.9
I2-13	18.2	13.8	52.5
H1-11	17.6	13.4	51.1
H1-40	17	13.4	49.8
J1-61	18.3	14.5	53.1
I2-09	16.5	13.5	50.1
J0-04	18	14	52.3
I2-48	16.5	13.3	49.3
H1-74	17.8	14.4	53

Fig. 8. Tabla número 2. Medidas de calotas con metopismo

Medidas de calotas SIN metopismo (muestra aleatoria)

<b>Número de calota</b>	<b>Medida frontal-occipital</b>	<b>Medida parietal izquierdo-parietal derecho</b>	<b>Circunferencia</b>
J1-02	17	13.7	50.5
I1-37	15.9	13.7	48.1
H1-28	16.6	13	48.3
J1-04	16	13.5	47.6
J1-59	16.2	13	47.6
J1-21	16.2	13.5	48.6
I1-13	17.5	14.5	52.6
J0-01	18	14.2	53.7
J0-07	16.9	14	50.4
I1-07	18.1	13	51
J1-52	17.7	14.2	52.5
I1-31	17.6	14.1	51.7
J1-39	17.3	13.5	50.5
I1-08	17	13	49
J1-17	16	14.3	49.2
H1-07	17	13.8	51.1
H1-55	15.7	13.6	48
J1-54	16	13	47.5
J1-41	20	15	57.5
H1-06	17	14.2	51.6

Fig. 9. Tabla número 3. Medidas de calotas sin metopismo

#### Relación morfológica y posible patrón:

- El aumento de la longitud anteroposterior (fronto-occipital) en los cráneos con metopismo podría reflejar una tendencia hacia formas más dolicocefalas (alargadas).
- La circunferencia mayor también puede asociarse a una leve expansión craneal compensatoria, posiblemente relacionada con una persistencia de la sutura metópica que mantiene la separación de los hemifrontalis durante el crecimiento.
- En contraste, las calotas sin metopismo tienden a ser más compactas, lo que calza con una fusión frontal temprana y un contorno craneal más globular o braquicefalo.

#### Interpretación morfológica:

El metopismo podría estar asociado a un patrón morfológico caracterizado por:

- Mayor longitud anteroposterior del cráneo.
- Circunferencia ligeramente superior, lo que podría reflejar un desarrollo más prolongado del frontal medio.
- Sin cambios significativos en la anchura parietal, lo que sugiere que la persistencia de la sutura metópica afecta principalmente al eje anteroposterior.

Los datos obtenidos complementan el análisis descriptivo y aportan una perspectiva cuantitativa que permite contrastar las dimensiones craneales entre calotas con y sin metopismo, y serán considerados en la interpretación general de los resultados obtenidos.

## Comparación promedio de medidas (en cm)

Variable	Con metopismo	Sin metopismo	
Longitud fronto-occipital	17.5	17.0	+0.5
Anchura biparietal	13.6	13.6	≈ igual
Circunferencia	51.2	50.2	+1.0

## Tendencias morfológicas observadas

Metopismo (+)	Sin metopismo (-)
↑ Longitud anteroposterior → cráneo más alargado (dolicocefalo)	↓ Longitud anteroposterior → craneo más corto
↑ Circunferencia craneal → expansión compensatoria	↓ Circunferencia → morfología más compacta
≈ Anchura parietal constante	≈ Anchura parietal constante

## Interpretación morfológica

### 🧠 Metopismo → patrón craneal dolicocefalo

Mayor desarrollo anteroposterior, posiblemente por persistencia de la sutura metopica que permite mayor crecimiento en el eje longitudinal

### 🧠 Sin metopismo → patrón craneal braquicéfalo o más globular

Fusión frontal temprana, que limita el crecimiento longitudinal y genera cráneos más compactos

## Síntesis visual del patrón morfológico



Fig. 10. Resumen gráfico del análisis de calotas con y sin metopismo. Fuente de elaboración propia.

### 3.6.b. Análisis fractal de la sutura metópica

Para complementar el análisis morfológico, se aplicó el método fractal de conteo de cajas (box-counting) con el fin de cuantificar el grado de complejidad e irregularidad del trayecto de la sutura metópica observada en cada calota con metopismo. Este método permite presentar la morfología de la sutura como una estructura autosimilar, donde la dimensión fractal ( $D$ ) expresa el nivel de interdigitación o ramificación de los bordes de la sutura.

Este procedimiento nos arroja 3 variables que se complementan para arrojar los resultados con la mayor exactitud posible, las cuales son:

- Dimensión fractal: indica que tan compleja o irregular es la forma de la sutura. Si el número fractal está más cercano a 1.0, sería una línea recta (muy simple), y si está más cercano a 2.0, la sutura sería extremadamente compleja y ramificada (alta complejidad). Una mayor dimensión fractal se relaciona con una mayor interdigitación (más pliegues y ramificaciones en la unión de los huesos frontales).
- Coeficiente de determinación ( $R_2$ ): mide que tan bien se ajustan los datos al modelo lineal log-log utilizado para calcular la dimensión fractal de la sutura, en otras palabras, mide la calidad del ajuste del modelo fractal. Si  $R_2=1$ , quiere decir que tiene el ajuste perfecto (sin desviaciones), si  $R_2>0.99$ , quiere decir que el resultado es muy confiable, y si  $R_2<0.95$ , quiere decir que el ajuste es débil y hay que revisar los ajustes del procesamiento.

- Error estándar: indica la incertidumbre estadística del valor de la dimensión fractal, representa cuánto podría variar la dimensión fractal si se repitiera el cálculo. Si se obtiene un valor muy pequeño como 0.01-0.03 quiere decir que tiene alta precisión y que no variaría tanto, pero si se obtiene un valor alto ( $>0.05$ ) quiere decir que existe mucha dispersión, lo cual baja la confianza y precisión de la dimensión fractal.

El procedimiento consistió en digitalizar imágenes de las calotas con metopismo donde fuera visible esta sutura, donde fueron preprocesadas digitalmente para mejorar el contraste y resaltar el trazado de la sutura, eliminando el fondo y otras estructuras óseas mediante conversión a escala de grises y posterior binarización de la imagen. Luego, se delimitó el trayecto visible de la sutura y se superpuso una malla de cuadrículas de diferentes tamaños, registrando el número de celdas que contenían parte del contorno sutural para cada escala. Con estos valores se elaboró un gráfico log-log entre  $\log(1/\epsilon)$  y  $\log(N(\epsilon))$ , donde  $N(\epsilon)$  representa el número de cajas ocupadas. La pendiente de la recta ajustada por regresión lineal en dicha relación corresponde a la dimensión fractal ( $D$ ), mientras que el coeficiente de determinación ( $R_2$ ) permitió evaluar la calidad del ajuste y el error estándar que se obtuvo a partir de la dispersión de los puntos respecto de la recta. Este procedimiento permitió cuantificar el grado de irregularidad y complejidad geométrica de la sutura metópica visible en cada ejemplar analizado.



Fig. 11. Imagen de calota J1-35 con sutura metópica utilizada en el método box-counting

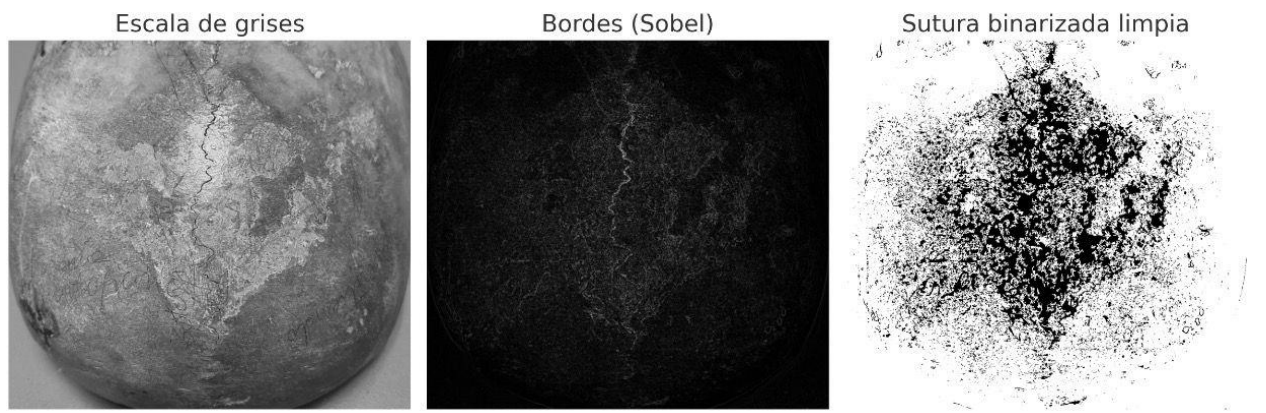


Fig. 12. Procedimiento detallado de aplicación de escala de grises, bordes, y la obtención de la sutura binarizada limpia

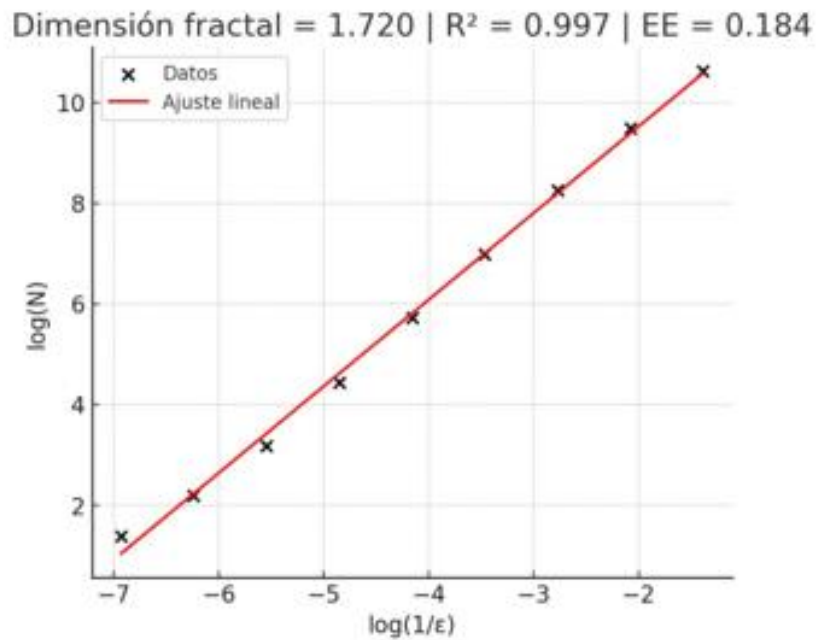


Fig. 13. Resultado obtenido en forma de gráfico con una dimensión fractal de 1.720, un coeficiente de determinación de 0.997 y un error estándar de 0.184

Los valores obtenidos mediante este método de análisis muestran variaciones en la dimensión fractal ( $D$ ) entre 1.45 y 2.04, lo cual indica que existen distintos niveles de complejidad morfológica en las suturas metópicas analizadas. En general, se observan altos valores de  $R_2$  ( $>0.99$ ) lo que confirma la confiabilidad de los ajustes realizados, y errores estándar bajos, que respaldan la precisión del método.

La siguiente tabla presenta los resultados detallados por ejemplar, acompañados de una breve interpretación cualitativa según el grado de irregularidad de la sutura. Se aprecia que las calotas I2-13, J1-14 y J1-61 presentan las dimensiones fractales más altas ( $>2.0$ ), asociadas a una morfología muy compleja y fuertemente ramificada. En contraste, las calotas H1-40 e I2-09 muestran valores inferiores a 1.70, correspondientes a suturas menos irregulares o parcialmente lineales.

### **Box-counting Dimensión Fractal de Calotas con Metopismo**

<b>Código Calota</b>	<b>Dimensión/ Número Fractal</b>	<b>Coefficiente de determinación <math>R_2</math></b>	<b>Error estándar</b>	<b>Interpretación</b>	<b>Complejidad</b>
I2-07	1.77	0.9997	0.0096	Morfología compleja, un poco ramificada e irregular	Alta
J0-04	1.84	0.998	0.026	Morfología bastante compleja e irregular, muy rugoso y ramificado	Muy alta
I2-16	1.76	0.9989	0.021	Morfología con complejidad intermedia, no tan ramificada ni irregular	Alta
J1-26	1.68	0.99	0.20	Morfología sinuosa e irregular	Alta-media
I2-13	2.048	0.9996	0.0174	Morfología muy compleja, superficie muy irregular	Muy alta
J1-14	2.042	0.9998	0.0124	Morfología muy compleja e irregular	Muy alta
J1-61	2.033	0.99996	0.0060	Morfología muy compleja e irregular	Muy alta
J1-35	1.720	0.997	0.184	Morfología de alta complejidad y no tan ramificada	Alta
I1-15	1.681	0.995	0.214	Morfología de media complejidad	Alta-media
I2-09	1.614	0.996	0.046	Morfología intermedia entre lineal y altamente ramificada	Alta-media
I2-48	1.702	0.990	0.078	Morfología de alta complejidad	Alta
H1-74	1.685	0.992	0.067	Morfología de alta complejidad e irregularidad	Alta-media
H1-40	1.45	0.99	0.26	Morfología de complejidad moderada	Baja
H1-11	1.65	0.99	0.19	Morfología de alta complejidad	Alta-media

Fig. 14. Tabla número 4. Dimensión fractal (D), coeficiente de determinación ( $R_2$ ) y error estándar en calotas con metopismo. Fuente de elaboración propia.

### 3.7. Análisis de los datos

Los datos recolectados serán analizados mediante estadística descriptiva simple, utilizando porcentajes para determinar la proporción de calotas que presentan sutura metópica. La información se representará mediante tablas y gráficos comparativos que faciliten la interpretación de los resultados. Posteriormente, los valores obtenidos se contrastarán con las frecuencias reportadas en estudios internacionales (Ajmani et al., 1983; del Sol et al., 1989; Shah et al., 2011; Castilho et al., 2006), con el fin de establecer similitudes o diferencias respecto al rango global de 5-10% descrito en la literatura científica.

Los datos obtenidos durante la recolección fueron organizados, codificados y analizados con el propósito de identificar la frecuencia, morfología y posibles patrones de distribución del metopismo en la muestra estudiada. En todos los casos, los resultados numéricos fueron acompañados de representaciones gráficas, tablas y esquemas explicativos que facilitan la comprensión de los patrones observados. Las frecuencias se expresaron en porcentajes, y las tendencias métricas fueron representadas mediante gráficos comparativos, mientras que los valores fractales se expresaron en términos de complejidad morfológica. Finalmente, los datos obtenidos se integraron de manera interpretativa, relacionando los resultados descriptivos, métricos y fractales con los objetivos del estudio y con los antecedentes bibliográficos revisados.

### 3.8. Consideraciones éticas

El presente estudio se enmarca dentro de los principios éticos del manejo responsable de restos humanos establecidos por la Asociación Americana de Antropología (AAA, 2012) y las normas del Departamento de Anatomía de la Universidad de Concepción. Los ejemplares analizados forman parte de una colección científica destinada exclusivamente a la docencia y la investigación, por lo que no se realizaron intervenciones invasivas ni alteraciones en las piezas óseas. Toda la información obtenida se maneja con respeto, confidencialidad y fines netamente académicos.

Como toda investigación osteológica, el presente estudio enfrenta algunas limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados. En primer lugar, el tamaño muestral se restringe a las calotas disponibles en la colección, lo que podría limitar la extrapolación de los hallazgos en otras poblaciones; ya que, existen estudios con más calotas y otros con menos calotas. En segundo lugar, la ausencia de información biológica sobre los individuos (edad, sexo, estatura, origen geográfico o condición socioeconómica) impide establecer correlaciones biológicas o culturales precisas; aunque, de todos los estudios revisados, la mayoría no cuenta con ninguno de estos antecedentes. La colección estudiada corresponde a individuos de los siglos XIX y XX, por lo que los resultados obtenidos reflejan un contexto histórico particular y podrían no representar completamente a poblaciones chilenas contemporáneas, ya que, desde ese periodo histórico hasta la actualidad han cambiado bastante las condiciones y mejoras en la manera de vivir de la población chilena; pero a pesar de eso, la muestra conserva un alto valor científico y constituye una referencia válida para el estudio de la variabilidad epigenética craneal en Chile.

La metodología empleada en esta investigación permitió establecer un registro sistemático, controlado y replicable de la sutura metópica en la colección osteológica analizada. La combinación de observaciones cualitativas, mediciones morfométricas cuantitativas y el análisis mediante plataformas de análisis fotográfico proporcionó una visión integral del fenómeno, asegurando la validez, y la fiabilidad de los resultados obtenidos. El enfoque aplicado, de carácter descriptivo y comparativo, constituye la base sobre la cual se desarrollan los análisis y las interpretaciones morfológicas que se presentan en el siguiente capítulo, lo que permite comprender la frecuencia y variabilidad de la sutura metópica en el contexto de la antropología física y forense chilena.

## Capitulo IV. Resultados, discusión y conclusiones.

Este capítulo tiene por objetivo exponer y analizar los resultados obtenidos a partir del estudio anatómico descriptivo realizado sobre las calotas craneales pertenecientes a la colección osteológica del Departamento de Anatomía de la Universidad de Concepción. La presentación de los hallazgos se organiza en función de los objetivos específicos planteados al inicio, abordando la frecuencia de la sutura metópica, la variabilidad morfológica observada, los patrones de complejidad asociados a su trayectoria, la comparación morfométrica entre calotas con y sin metopismo y su correspondencia con datos internacionales; por lo que los resultados se presentarán de manera ordenada, acorde a la numeración de los objetivos específicos planteados.

Cada apartado de resultados se presenta de manera sistemática, describiendo los rasgos encontrados sin interpretar aún su resultado. Posteriormente, estos hallazgos serán discutidos a la luz de la literatura científica y los antecedentes teóricos previamente expuestos en capítulos anteriores, con el fin de contextualizar la relevancia anatómica y forense de la persistencia de la sutura metópica o metopismo. Finalmente, se presentan conclusiones parciales que sintetizan los aportes fundamentales de este capítulo y permiten establecer su relación con los objetivos de la investigación.

## 4.1. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de 248 calotas craneales pertenecientes a la colección osteológica del Departamento de Anatomía de la Universidad de Concepción. Los resultados se organizan siguiendo el orden de los objetivos específicos definidos en esta investigación, abarcando la frecuencia del metopismo, su variabilidad morfológica, el análisis fractal, la comparación morfométrica entre calotas con y sin metopismo, su relación con investigaciones internacionales y con el ámbito forense.

### 4.1.a. Frecuencia del metopismo en la muestra

Del total de 248 calotas analizadas, 14 ejemplares presentaron sutura metópica, lo que corresponde a una frecuencia de 5.6% dentro de la colección. Este valor se encuentra dentro del rango reportado internacionalmente para poblaciones contemporáneas (5-10%), lo que sugiere que la frecuencia observada en la muestra chilena no difiere significativamente de las tendencias globales descritas en países como India, Nigeria, Brasil, Polonia o Japón. La obtención e identificación de este porcentaje permite establecer un referente inicial para futuras investigaciones en colecciones osteológicas contemporáneas chilenas, dado que este tipo de estudios es prácticamente inexistente en el país desde el artículo publicado por del Sol et al. (1989).

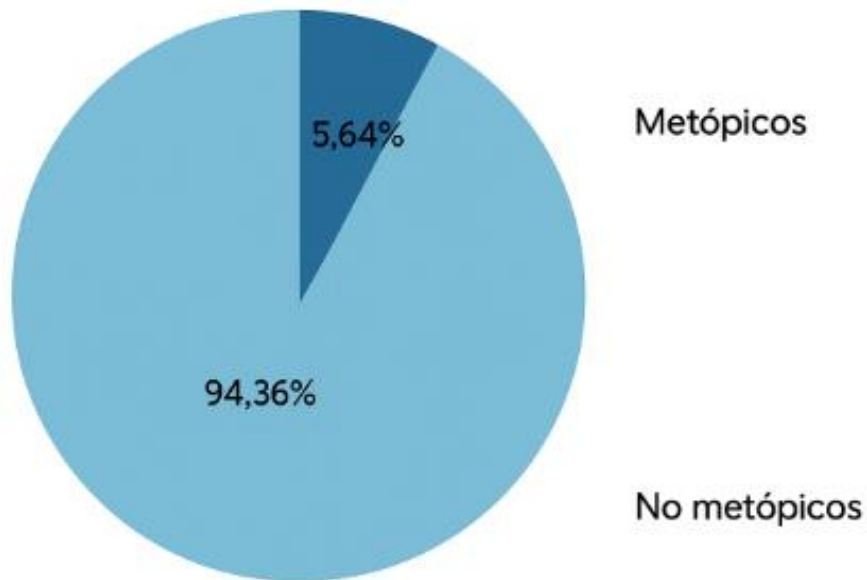


Fig. 15. Gráfico número 1. Porcentajes obtenidos en este estudio en calotas con metopismo y sin metopismo.

#### 4.1.b. Variabilidad morfológica de la sutura metópica

Entre las 14 calotas con sutura metópica se observaron variaciones tanto en su variación anatómica como en su morfología. Se registraron suturas:

- Completas: 9
- Incompletas: 5

Las suturas completas presentaron un trayecto continuo y relativamente uniforme, mientras que las suturas incompletas se extienden de forma parcial solo en el tercio superior de la sutura metópica, además de que no se presentaron suturas en V ni suturas

dobles. En general, ambos tipos de suturas (completas e incompletas) presentan trayectorias con ondulaciones y patrones interdigitados, concordantes con los reportados por Skrzat et al. (2004).



Fig. 16. Calota I2-09 con sutura metópica incompleta.



Fig. 17. Calota I2-07 con sutura metópica completa.

#### 4.1.c. Complejidad morfológica mediante análisis fractal

El análisis fractal aplicado a las imágenes de las suturas metópicas de las calotas con metopismo permitió cuantificar su complejidad morfológica mediante el método de box-counting.

Los valores obtenidos demostraron lo siguiente:

- Dimensión fractal (D): valores dentro del rango esperado para suturas craneales irregulares, identificando una complejidad moderada.
- Coeficiente de determinación ( $R_2$ ): superior a 0.99 en todos los casos, lo que evidencia un ajuste excelente al modelo lineal log-log.
- Error estándar: valores bajos, lo que confirma la estabilidad del cálculo fractal.

Estos resultados respaldan la naturaleza compleja y autosimilar de la sutura metópica, cuyo nivel de interdigitación aumenta hacia la región superior del hueso frontal, tal como se menciona en estudios previos. Los valores de dimensión fractal obtenidos refuerzan esta observación, ya que confirman que la sutura metópica no constituye una estructura homogénea, sino que representa una expresión altamente variable dentro de una misma colección osteológica.

#### 4.1.d. Comparación morfométrica entre calotas con y sin metopismo

Se compararon tres parámetros morfométricos entre 14 calotas con metopismo y 20 calotas sin metopismo, los cuales son: longitud fronto-occipital, anchura biparietal y circunferencia craneal.

Los resultados indican que:

- Las calotas con metopismo presentan mayor longitud anteroposterior y una circunferencia craneal ligeramente mayor, además de una mayor circunferencia craneal.

- Las calotas sin metopismo presentan proporciones más compactas y globulares, y una anchura biparietal similar a la de las calotas con metopismo, además de una menor circunferencia craneal.

Estos patrones indican que la persistencia de la sutura metópica podría asociarse a un crecimiento craneal más prolongado en sentido anteroposterior, lo que se traduce morfológicamente en cráneos más alargados o dolicocefalos; cráneos los cuales son morfológicamente más alargados en sentido anteroposterior y relativamente estrechos de anchura biparietal (de lado a lado).



Fig. 18. Calota H1-11 con metopismo.



Fig. 19. Calota I1-52 sin metopismo.

#### 4.1.e. Comparación con estudios internacionales

La frecuencia encontrada y obtenida en esta colección osteológica es de un 5.6%, lo cual es coherente con el rango mundial estimado (5-10%) y con estudios previos realizados en diversos países, en los cuales se han obtenido las siguientes frecuencias:

- India 7-8% (Shah et al., 2011 ; Murlimanju et al. 2011)
- Nigeria 9.5% (Ajmani et al., 1983)
- Brasil 7.2% (Castilho et al., 2006)
- Polonia 6.5% (Skratz et al., 2004)
- Japón 8.1% (Nakatani et al., 1998)

La correspondencia entre los resultados de esta investigación y los valores internacionales permite situar a la población chilena dentro del patrón global de variabilidad del metopismo, sin evidenciar particularidades extremas asociadas a la colección estudiada. La frecuencia registrada resulta comparable con los escasos estudios previos desarrollados en Chile y con los estudios realizados alrededor del mundo, lo que refuerza la consistencia de los resultados y su validez como referente poblacional amplio, contribuyendo a la comprensión de la variabilidad biológica humana desde una perspectiva comparativa; la cual pueda ser vista y utilizada como un referente osteológico en estudios que contemplen a población chilena contemporánea.

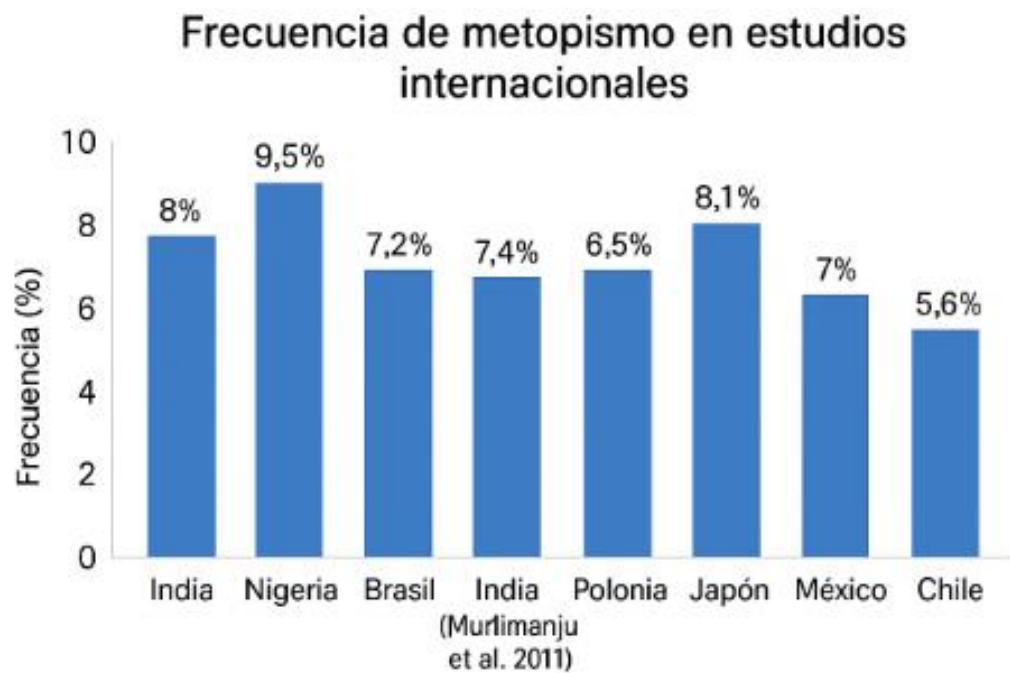


Fig. 20. Gráfico número 2. Frecuencia del metopismo en estudios internacionales según Murlimanju et al., 2011; agregando el porcentaje obtenido en este estudio hallado en la colección osteológica del Departamento de Anatomía de la Universidad de Concepción.

#### 4.1.f. Potencial aplicación forense del metopismo

Durante la observación morfológica se constató que todas las suturas metópicas presentaron:

- Bordes dentados
- Irregularidades propias de una sutura
- Esclerosis ósea
- Ausencia de márgenes angulados o lineales propios de fracturas

Estas características permiten diferenciar con claridad la sutura metópica de fracturas traumáticas verticales, evitando errores diagnósticos importantes en contextos forenses y médicos. Dado que el metopismo puede confundirse con líneas de fractura en radiografías simples, contar con una referencia anatómica local aumenta la precisión de la interpretación radiológica y osteológica. La observación macroscópica detallada permitió identificar características morfológicas constantes, como bordes irregulares y signos de remodelación ósea, que facilitan su reconocimiento como una variante anatómica antigua. La documentación sistemática de este rasgo en la colección del Departamento de Anatomía de la Universidad de Concepción contribuye a fortalecer los criterios diagnósticos utilizados en contextos forenses y clínicos, reduciendo el riesgo de interpretaciones erróneas en el análisis de restos óseos humanos.

## 4.2. Discusión

Los resultados obtenidos sobre la frecuencia y variabilidad morfológica de la sutura metópica en la colección osteológica del Departamento de Anatomía de la Universidad de Concepción permiten comprender este rasgo epigenético dentro de un marco comparativo amplio que incluye antecedentes anatómicos, evolutivos y poblacionales. Estos resultados permiten situar la frecuencia del metopismo de la colección contemporánea chilena dentro de los rangos ampliamente descritos en la literatura internacional. La proporción observada es consistente con los valores obtenidos en poblaciones europeas, asiáticas, africanas y sudamericanas, lo que reafirma la estabilidad histórica de este rasgo epigenético y su comportamiento constante entre grupos humanos modernos (Ajmani et al., 1983; Castilho et al., 2006; del Sol, Olave & Prates, 1989). La concordancia con estas referencias indica que el metopismo no constituye una variación aislada o excepcional dentro del contexto chileno, sino que forma parte del patrón global de diversidad sutural.

La frecuencia hallada (5.6%) se ubica dentro del rango descrito internacionalmente (5-10%), coincidiendo con estudios realizados en África, Asia y América del Sur (Ajmani et al., 1983; Castilho et al., 2006; Shah et al., 2011). Esta estabilidad relativa confirma que; aún en contextos geográficos y genéticos diversos, la persistencia de la sutura metópica mantiene una proporción semejante, lo que sugiere que su persistencia está influida por factores heredables más que por condiciones ambientales extremas, acorde con lo planteado por Hauser & De Stefano (1989) respecto del comportamiento conservador de los rasgos epigenéticos craneales.

En términos morfológicos, las formas incompletas lineales fueron las más representadas, lo que también ha sido reportado en investigaciones internacionales como las de Castilho et al. (2006). La prevalencia de estas variantes parece estar relacionada con procesos

diferenciales de osificación frontal y con la interacción entre factores genéticos y mecánicos durante el desarrollo craneal, teoría respaldada por los modelos biológicos de desarrollo sutural expuestos por Opperman (2000) y Rice, Rice & Thesleff (2003). Aunque algunos autores históricos atribuyeron estas variaciones a causas patológicas o raciales, la evidencia actual descarta dichas interpretaciones, mostrando que la variabilidad morfológica responde a patrones de crecimiento normales y a la influencia combinada de la cresta neural y el mesodermo praxial (Manzanares, Goret,-Nicaise & Dhem, 1998; Cohen, 1993).

La comparación morfométrica entre calotas con y sin metopismo aporta una dimensión adicional al análisis anatómico, aunque estas diferencias no necesariamente implican relaciones causales directas, diversos autores han señalado que la persistencia de suturas craneales puede estar asociada con patrones específicos de desarrollo neurocraneal y con variaciones en la dirección predominante del crecimiento frontal (Enlow & Hans, 1996; del Sol et al., 1989). Desde esta perspectiva, los resultados obtenidos permiten considerar la posibilidad de que los ejemplares con metopismo presenten un proceso de fusión frontal más tardío o modulado por tensiones diferenciales.

La presencia exclusiva de características anatómicas propias de las suturas fisiológicas como bordes dentados, bordes escleróticos, un trayecto atípico e irregular, características las cuales ayudan a distinguir esta sutura de fracturas agudas, como lo explica la literatura clínica (Tsoucalas et al., 2021). El reconocimiento correcto de este rasgo reduce el riesgo de errores interpretativos en estudios radiológicos o en intervenciones quirúrgicas, reforzando la necesidad de contar con referencias locales que describan sus particularidades, como por ejemplo el marco referencial osteológico de población chilena que se genera a raíz de este estudio realizado. De esta manera, los resultados de esta investigación proporcionan información aplicable directamente a la práctica forense,

ampliando la base comparativa para la identificación de restos humanos y el análisis de lesiones o traumas óseos.

En cuanto a la dimensión poblacional, la ausencia de información asociada a variables biológicas (como sexo o edad) representa una limitación para establecer correlaciones específicas, tema también mencionado en estudios previos sobre colecciones osteológicas históricas. Sin embargo, esta limitación no invalida los resultados, dado que la mayoría de los trabajos sobre metopismo han sido realizados en muestras sin información demográfica detallada, especialmente en el ámbito latinoamericano, donde la investigación sigue siendo escasa (del Sol, Olave & Prates, 1989). A pesar de ello, la muestra utilizada mantiene un valor científico significativo, ya que contribuye una referencia contemporánea para la región y permite contrastar patrones con estudios previos realizados en Chile, aunque no sean tantos.

El análisis de la complejidad mediante la dimensión fractal refuerza esta interpretación, tal como lo ha indicado Skrzat et al. (2004), las suturas craneales poseen un patrón de interdigitación autosimilar en distintos niveles de escala, lo que explica la irregularidad intrínseca de su forma. En el caso del metopismo, la persistencia de esta complejidad sugiere que la sutura mantiene características biomecánicas funcionales en su trayecto, incluso cuando permanece abierta más allá de los primeros años de vida. Este comportamiento es congruente con lo planteado por Opperman (2000) respecto del rol de las suturas como centros de crecimiento, capaces de adaptarse a demandas tensionales y espaciales.

En la literatura científica, la dimensión fractal ha sido utilizada como una herramienta cuantitativa para describir la complejidad geométrica y el grado de interdigitación de las suturas craneales. Este enfoque permite caracterizar la irregularidad del trayecto sutural y

comparar patrones morfológicos entre distintos individuos o regiones del cráneo. Sin embargo, la evidencia disponible indica que la dimensión fractal no constituye un indicador directo del grado de sinostosis o del cierre sutural. Los procesos de sinostosis se encuentran principalmente asociados a mecanismos biológicos relacionados con la osificación sutural, regulados por factores genéticos, celulares y biomecánicos, los cuales no pueden inferirse únicamente a partir de la complejidad morfológica de la sutura, por lo que el análisis fractal debe interpretarse principalmente como una medida de la complejidad estructural de la sutura más que como un marcador de grado de fusión ósea.

En las calotas que presentan metopismo, el índice craneal descrito se caracteriza por una mayor longitud anteroposterior (fronto-occipital) en relación con la anchura biparietal, lo que sugiere una tendencia hacia cráneos relativamente más alargados de acuerdo con la clasificación antropométrica basada en el índice craneal, calculado como la relación entre la anchura máxima y la longitud máxima del cráneo multiplicada por cien, esta configuración morfológica se aproxima al patrón dolicocefalo, el cual se define por valores inferiores a 75; por lo que la presencia del metopismo podría asociarse a una morfología craneal más elongada, reflejada en un menor índice craneal, lo que es consistente con la predominancia del crecimiento en el eje anteroposterior observada en las calotas estudiadas.

$$\text{Índice craneal} = \frac{\text{Anchura máxima (biparietal)}}{\text{Longitud máxima (fronto-occipital)}} \times 100$$

Finalmente, la frecuencia encontrada reafirma que el metopismo constituye un rasgo epigenético de baja prevalencia, pero estable, permitiendo su incorporación en estudios

de filiación biológica y diversidad poblacional dentro de Chile. La evidencia presentada sostiene la necesidad de continuar desarrollando investigaciones osteológicas contemporáneas que actualicen el marco comparativo regional, particularmente considerando la relevancia forense, anatómica y antropológica de este rasgo epigenético.

### 4.3. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este capítulo permitieron cumplir de manera sólida con los objetivos específicos planteados, y aportan información relevante sobre la frecuencia y la variabilidad morfológica de la sutura metópica en la colección osteológica contemporánea analizada. En primer lugar, la frecuencia registrada del metopismo (5.6%) se alinea de forma coherente con los valores reportados internacionalmente, los cuales oscilan entre un 5% y un 10% en diversas poblaciones modernas (Ajmani et al., 1983; Castilho et al., 2006; Shah et al., 2011), dato confirmado también en el análisis comparativo presentado en este capítulo. Esta correspondencia sitúa a la población chilena representada por esta colección dentro del patrón global de variabilidad sutural, lo que indica que el metopismo no constituye un rasgo excepcional ni minoritario dentro del contexto nacional.

El análisis morfológico mostró una clara predominancia de las suturas metópicas completas, característica también documentada en estudios internacionales y asociada a procesos diferenciales de osificación frontal, influenciados por factores genéticos y biomecánicos, tal como han señalado Opperman (2000) y Rice et al. (2003). La presencia de variantes morfológicas dentadas, irregulares y con esclerosis ósea permitió, además, distinguir con claridad la sutura metópica de fracturas traumáticas, reforzando su valor diagnóstico en contextos forenses y clínicos. En efecto, la posibilidad de confundir líneas suturales con fracturas ha sido previamente destacada en la literatura radiológica y

anat6mica (Keats, 1996; Das et al., 2005; Bademci et al., 2004), y los resultados de esta investigaci3n contribuyen a reducir ese margen de error mediante la descripci3n de patrones anat6micos locales.

El an6lisis fractal de la sutura met6pica aport3 una perspectiva innovadora al estudio de este rasgo, al permitir cuantificar la complejidad morfol6gica de su trayectoria. La variabilidad fractal observada concuerda con la descripci3n de la sutura met6pica como un rasgo epigen6tico altamente pl6stico, condicionado por la interacci3n entre factores gen6ticos, mec6nicos y de crecimiento craneal (Hauser & De Stefano, 1989; Berry & Berry, 1967). De esta forma, los valores obtenidos complementan la caracterizaci3n ya realizada a trav6s del an6lisis cualitativo y morfom6trico, y contribuyen a fortalecer el entendimiento de la din6mica sutural en la regi3n frontal.

Por otra parte, la comparaci3n morfom6trica entre cr6neos con y sin metopismo evidenci3 diferencias leves en dimensiones craneales y frontales, tendencia que tambi3n ha sido mencionada en estudios previos y que sugiere que la persistencia de la sutura met6pica podr3 relacionarse con trayectorias particulares de crecimiento anteroposterior del neurocr6neo, adem6s de un ensanchamiento mediolateral del cr6neo (Nikolova et al., 2022). Aunque estas diferencias no son concluyentes, aportan una base preliminar para futuras investigaciones que integren muestras m6s amplias y an6lisis estad6sticos inferenciales, que adem6s pueda incluir diferencias morfol6gicas entre colecciones osteol6gicas.

La revisi3n comparativa con estudios internacionales permiti3 contextualizar los hallazgos dentro de un marco poblacional amplio, mostrando que la frecuencia del metopismo observada en la colecci3n chilena es consistente con los valores registrados en India, Nigeria, Brasil, Polonia y Jap3n, cuyos rangos de frecuencia oscilan entre 6% y 9%

(Shah et al., 2011; Ajmani et al., 1983; Castilho et al., 2006; Skrzat et al., 2004; Nakatani et al., 1998). Esta concordancia respalda la idea de que los rasgos epigenéticos del cráneo tienden a ser relativamente estables entre poblaciones humanas, como han indicado Hauser & De Stefano (1989), lo que refuerza el valor antropológico y comparativo de este rasgo anatómico.

A modo de conclusión general, los resultados obtenidos ponen de manifiesto la relevancia forense del metopismo, especialmente en relación con la identificación de estructuras óseas en contextos medicolegales. La confirmación de que la sutura metópica presenta márgenes dentados, irregulares y con esclerosis ósea constituye un criterio fundamental para diferenciarla de fracturas craneales verticales, lo que puede evitar diagnósticos erróneos en radiología y antropología forense, tal como señala la literatura especializada (Roa, Moraga & Cantín, 2011; del Sol et al., 1989).

Esta investigación permite concluir que la sutura metópica, lejos de ser un simple remanente anatómico del desarrollo craneal, constituye un rasgo epigenético, poblacional y clínicamente relevante, aunque su significado clínico aún es incierto, por lo que requiere ahondar mucho más en el tema y seguir investigando (Podstawka et al., 2024). Su estudio contribuye a enriquecer el conocimiento sobre la variabilidad craneal en Chile en el ámbito de la epigenética, fortalece la precisión diagnóstica en contextos médicos y forenses, y abre nuevas líneas de investigación orientadas a integrar métodos morfométricos avanzados, como la integración del análisis fractal en este estudio, también a integrar análisis estadísticos y comparaciones regionales más amplias.

Tal como afirman Braga & Ríos (2019), los rasgos epigenéticos del cráneo representan un recurso valioso para entender la diversidad humana y sus implicancias biológicas y

culturales, y los resultados aquí presentados aportan de manera significativa a ese campo de conocimiento y estudio en el mundo.

## Bibliografía

- Scheuer, L., & Black, S. (2000). *Developmental juvenile osteology*. Academic Press.
- Standring, S. (Ed.). (2016). *Gray's anatomy: The anatomical basis of clinical practice* (41<sup>st</sup> ed.). Elsevier.
- Berry, A. C., & Berry, R. J. (1967). Epigenetic variation in the human cranium. *Journal of Anatomy*, 101(2), 361-379.
- Hauser, G., & De Stefano, G. F. (1989). *Epigenetic variants of the human skull*. Schweizerbart.
- Ajmani, M. L., Mittal, R. K., & Jain, S. P. (1983). Incidence of the metopic suture in adult Nigerian skulls. *Journal of Anatomy*, 137(1), 177-183.
- Sánchez-Lara, P. A., Graham, J. M., Hing, A. V., Lee, J., & Cunningham, M. (2015). The morphogenesis of metopic synostosis: Etiology, clinical presentation, and management. *American Journal of Medical Genetics Part A*, 167A(9), 1976-1988.
- Comas, J. (1943). *El metopismo: sus causas y frecuencia en los cráneos mexicanos*. *Anales del instituto de Etnografía Americana*, 4, 121-159. Universidad Nacional de Cuyo.
- Braga, J., & Ríos, L. (2019). Epigenetic traits and their applications in biological anthropology. *Anthropological Science*, 127(2), 101-113.
- Shah, S., Rathod, S. P., Patel, S., & Gohil, B. J. (2011). Persistence of metopic suture in adult Indian skulls: its morphological and clinical significance. *Journal of Morphological Sciences*, 28(2), 144-147.
- Roa, I., Moraga, J. I., & Cantín, M. (2011). *Metopismo: Bases morfológicas, implicancias clínicas y reporte de caso*. *International Journal of Morphology*, 29(3), 992-999.

- Celso, A, C. (s. I a.C.) *De Medicina* (Libri VIII). Roma.
- Cunha, E. (2006). Pathology as a source of information on past human populations. *International Journal of Osteoarchaeology*, 16(5), 535-543.
- Buikstra, J, E., & Ubelaker, D, H. (Eds.). (1994). *Standards for data collection from human skeletal remains*. Arkansas Archaeological Survey.
- Sierp, I., & Henneberg, M. (2015). Epigenetic cranial traits: their biological basis and utility in forensic identification. *Forensic Science International*, 257, 513.e1-513.e8.
- Lattanzi, R., Barba, M., & Viola, S. (2017). Persistence of metopic suture in adults: clinical relevance and imaging considerations. *Neurosurgical Review*, 40(2), 211-218.
- Osborne, D, L., Simmons, T, L., & Nawrocki, S, P. (2014). Forensic anthropology and the application of skeletal analysis in human identification. *Forensic Science Review*, 26(1), 1-26.
- Hershkovitz, I., Kornreich, L., Laron, Z., & Edelson, M. (2019). Morphological variation of cranial sutures: insights into growth patterns and population diversity. *Anatomical Record*, 302(6), 923-935.
- Rogers, T, L. (2017). Skeletal variation and forensic anthropology. *Academic Forensic Pathology*, 7(2), 182-190.
- Ajmani, M. L., Antón, S. C., & Iyengar, B. (1983). *Characteristics of the metopic suture in adult Nigerians*. *Anthropologischer Anzeiger*, 41(3), 211-218.
- Del Sol, M., Olave, E., & Prates, J. C. (1989). Persistence of the metopic suture in skull adults. *Revista Chilena de Anatomía*, 7(2), 149-153.
- Geneser, F. (2007). *Histología*. Médica Panamericana.
- Gray, H. (1988). *Anatomía de Gray* (38ª ed.). Churchill Livingstone.
- Keith, A. (1948). *Human Embryology and Morphology* (6.a ed.). Edward Arnold.
- Madeira, M. C. (1995). *Anatomía de la cabeza y del cuello*. Editorial Sarvier.
- Manzanares, M. C., Goret-Nicaise, M., & Dhem, A. (1988). Metopism: A morphometric and histological study. *Journal of Anatomy*, 161, 173-183.

- Moore, K. L., & Persaud, T. V. N. (2002). *Embriología clínica* (7a ed.). Elsevier.
- Nakatani, T., Tanaka, H., Mizukami, S., & Shiraishi, Y. (1998). Complete and incomplete metopism in human skulls from Osaka. *Anatomischer Anzeiger*, 180(4), 341-344.
- Romanes, G. J. (1972). *Cunningham's Manual of Practical Anatomy* (15.a ed., Vol. 1). Oxford University Press.
- Skrzat, J., Walocha, J., & Zawilinski, J. (2004). Persistence of metopic suture in human skulls. *Folia Morphologica*, 63(4), 495-500.
- Watzek, G., Ulm, C., & Bernhart, T. (1982). Growth of the human neurocranium. *Acta anatómica*, 112(2), 97-101.
- Weinzweig, J., Kirschner, R. E., Farley, A., Radu, C., & Whitaker, L. A. (2003). Metopic Synostosis: Defining the temporal sequence of normal suture fusion and differentiating it from metopic craniosyntosis. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 112(5), 1211-1218.
- Castilho, F. A., Oda, J. Y., & Sant'Ana, D. M. G. (2006). Metopism in adult dry skulls from Southern Brazil. *International Journal of Morphology*, 24(1), 61-66.
- Portillo, F., Bastidas, F., & López, P. (2004). Malformaciones craneofaciales: diagnóstico y tratamiento. *Revista Facultad de Odontología Universidad de Antioquía*, 16(1), 52-62.
- Agarwal, S. K., Malhotra, V. K., Tewari, S. P., & Agarwal, S. (1979). Incidence of metopic suture in adult Indian crania. *Journal of the Anatomical Society of India*, 28(1), 21-24.
- Chaoui, R., Heling, K. S., & Karl, K. (2005). Prenatal three-dimensional ultrasound of the fetal metopic suture: Developmental aspects and clinical significance. *Ultrasound in Obstetrics & Gynecology*, 26(6), 633-638.
- Faro, C., Benoit, B., Chaoui, R., & Nicolaides, K. H. (2005). Three-dimensional sonographic description of the fetal metopic suture. *Ultrasound in Obstetrics & Gynecology*, 26(6), 618-621.

- Faro, C., Chaoui, R., Wegrzyn, P., Benoit, B., & Nicolaidis, K. H. (2006). Metopic suture in fetuses with trisomy 21 at 11-14 weeks of gestation. *Ultrasound in Obstetrics & Gynecology*, 27(2), 174-178.
- Cohen, M. M. (1993). *Craniosynostosis: Diagnosis, evaluation and management* (2.a ed.). Oxford University Press.
- Vu, T. H., Hwang, N., & Palko, J. (2001). Three-dimensional CT evaluation of metopic suture closure in infants. *Pediatric Radiology*, 31(7), 493-497.
- Longaker, M. T. (2001). Molecular and cellular biology of cranial sutures and development. *Frontiers of Oral Biology*, 8, 12-21.
- Manzanares, M. C., Goret-Nicaise, M., & Dhem, A. (1998). Metopic suture morphology: A new interpretation. *The Anatomical Record*, 250(3), 495-499.
- Opperman, L. A. (2000). Cranial sutures as intramembranous bone growth sites. *Developmental Dynamics*, 219(4), 472-485.
- Rice, D. P. C., Rice, R., & Thesleff, I. (2003). Molecular mechanisms in calvarial bone and suture development, and their relation to craniosynostosis. *The European Journal of Orthodontics*, 25(2), 139-148.
- Sahar, D. E., Longaker, M. T., & Quarto, N. (2005). Sox9 neural crest determinant gene controls patterning and closure of the cranial sutures. *Developmental Biology*, 278(2), 511-524.
- Das, S., Chandra, A., & Singh, P. (2005). *Metopic suture in adult dry skulls: Morphological study and differentiation from fractures*. *Journal of Anatomical Society of India*, 54(2), 25-29.
- Bademci, G., Karabulut, N., & Ozan, H. (2004). *Radiographic evaluation of persistent metopic suture in adults*. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 26(4), 304-307.
- Keats, T. E. (1996). *Atlas of normal roentgen variants that may simulate disease* (7<sup>th</sup> ed.). Mosby.

- Celebiler, O., Sengezer, M., & Turegun, M. (2007). *Duplication of the metopic suture associated with craniofacial clefts: Case report*. *Journal of Craniofacial Surgery*, 18(4), 871-874.
- McGuire, T. P., Cunningham, M. L., & Marucci, D. D. (2007). *Cleidocranial dysplasia: Surgical considerations and craniofacial features*. *Journal of Craniofacial Surgery*, 18(2), 278-284.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.a ed.). McGraw-Hill.
- Pakdeewong, N., & Tonho, Y. (2019). *Coexistence of complete metopic suture and Inca bone in Thai Skulls: Incidence, morphology and clinical applications*. *CMU Journal of Natural Sciences*, 18(1), 38-46.
- Tsoucalas, G., Malkidou, N., & Fiska, A. (2021). *Anatomy image series: Persistent metopic sutures in a series of dry skulls of Hellenic origin*. *Journal of Human Anatomy*, 5(1), 000158.
- Nikolova, S., Toneva, D., Tasheva-Terzieva, E., Lazarov, N. (2022). *Cranial morphology in metopism: A comparative geometric morphometric study*. *Annals of Anatomy – Anatomischer Anzeiger*, Volume 243, 2022. 151951.
- Podstawka, M, L., Czajka, A., Zaczkowski, K., Wisniewski, K., & Jaskólski, D. J. (2024). *Metopic Suture: Formation and clinical implications – A review*. *Aktualnosci Neurologiczne*, 24(1), 40-45.
- Roa, I., Moraga, J. I., & Cantín, M. (2011). *Metopismo: bases morfológicas, implicancias clínicas y reporte de un caso*. *International Journal of Morphology*, 29(3), 992-999. -