



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE MEDICINA
LICENCIATURA EN CIENCIA FORENSE**

**ANTROPOLOGÍA VIRTUAL: VARIACIÓN
MORFOLÓGICA DE LOS SENOS ESFENOIDALES
PARA IDENTIFICACIÓN HUMANA EN POBLACIÓN
MEXICANA**

Facultad de Medicina



T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN CIENCIA FORENSE**

P R E S E N T A :

JOEL ARMANDO ORTEGA ALBOR



**CIENCIA
FORENSE**
U N A M

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. MIRSHA EMMANUEL QUINTO SÁNCHEZ
CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2024**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

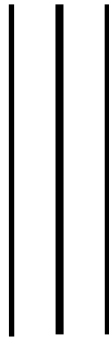
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

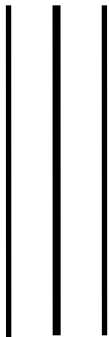


**FACULTAD DE MEDICINA
LICENCIATURA EN CIENCIA FORENSE**



**ANTROPOLOGÍA VIRTUAL: VARIACIÓN
MORFOLÓGICA DE LOS SENOS ESFENOIDALES
PARA IDENTIFICACIÓN HUMANA EN POBLACIÓN
MEXICANA**

Facultad de Medicina



T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN CIENCIA FORENSE**

P R E S E N T A :

JOEL ARMANDO ORTEGA ALBOR



**CIENCIA
FORENSE**
U N A M

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. MIRSHA EMMANUEL QUINTO SÁNCHEZ
CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2024**

Financiamiento

Este trabajo de investigación se encuentra adjunto al proyecto "*Morfometría geométrica craneofacial: bases de datos biométricas e innovación en identificación humana*", registrado ante la Comisión de Ética de la División de Investigación de la Facultad de Medicina de la UNAM (FM/DI/061/2020); y está financiado por el DGAPA-UNAM-PAPIIT-IA4000221, con una petición de beca de titulación para el desarrollo de esta tesis. Además, cuenta con presupuesto de la iniciativa *Virtual anthropology and databases for human identification in Mexican populations*, del programa *Cooperación Universitaria Alemana-Mexicana para Promover el Intercambio Académico entre Médicos forenses en México y Alemania* de la DAAD-GIZ.

Agradecimientos y dedicatorias

En orden simultáneo y no específico de aparición.

Al Dr. Mirsha Quinto-Sánchez, por su asesoría, dirección y tiempo, pero, sobre todo, por su paciencia y por cada una de las oportunidades brindadas durante el desarrollo de esta tesis. Más allá de su tutoría, por su amistad, sin usted no habría encontrado el impulso suficiente para enamorarme y desenvolverme en cada una de las áreas en las que he podido incursionar.

A las personas que conforman la iniciativa *Virtual anthropology and databases for human identification in Mexican populations*, la Dra. Lumila Menéndez, específicamente, por todas sus aportaciones teóricas y prácticas; y a las personas que conocí del Instituto de Servicios Periciales de la Fiscalía General del Estado de Oaxaca y la Universidad Benito Juárez de Oaxaca, por su hospitalidad y su apoyo a lo largo de cada visita realizada.

A mis compañeras y compañero contemporáneo de tesis, Alfonso, Clara, Daniela, Ibeth y Monserrat, por sus preguntas, su apoyo y su continuo impacto en mi aprendizaje; gracias por hacerme cuestionarme cada uno de mis planteamientos.

Al Laboratorio de Antropología y Odontología Forense (LAOF) y al flujo de personas de servicio social con las cuales he compartido espacio frecuentemente y me han brindado calidez, nuevos conocimientos e interrogantes.

A la comunidad estudiantil y en general a toda la Escuela Nacional de Ciencias Forenses (ENaCiF), para que continúen abogando por la consolidación de una mejor ciencia forense en México.

A mi familia; mamá, papá, les amo, gracias por apoyarme (y aguantarme) en todos los aspectos imaginables —e inimaginables—; por brindarme un techo donde descansar (y seguir estudiando y trabajando), y mantenerme motivado en mi preparación académica y profesional. A mis hermanas, Andrea y Eva, por brindarme momentos de tranquilidad a través de sus risas, miradas y escucha cuando las necesité. A mis tías, mis primas y mis abuelitos; en particular a mis abuelitas que pudieron estar conmigo en los eventos más relevantes y decisivos.

A Alejandro, Alexis, Alin, Dani, Gina, Gino, Hiram, Itzel, Perla, Sarahi, Sergio, Sophie, así como a sus respectivas familias y conocidos, por aportarme luz en distintos momentos de mi espacio-tiempo y convertirse en un hogar para mí.

A las personas que integran Científicos Forenses Mexicanos (CIFOMEX) y todos los proyectos informativos y divulgativos, para que sigan siendo un rincón de difusión científica y humanitaria accesible desde y para la sociedad.

A Andrea, Clara, Elvira, Isa, Javier, JL, Jaza, Mariel, Óscar, Paulina, Renée, Stivaly, Viri, personas que he conocido en clases, los voluntariados, la recreación de mis otras pasiones y mi trabajo, porque su seguimiento e interés me ha permitido mantener habilitada y aplicada una interdisciplina maravillosa en cada uno de los proyectos en los que he sido partícipe.

A todas las colectivas y colectivos, familiares e integrantes de la comunidad buscadora e identificatoria que se preparan por fuerza de sus propios conocimientos, medios y recursos, constituyendo un motor de concientización y sensibilización humana.

Y finalmente, a todas aquellas personas, seres y entes que apenas podría nombrar en una tesis enfocada solamente en agradecimientos y dedicatorias. Su soporte me ha mantenido inspirado y motivado antes, durante y —muy por seguro— después de esta tesis.



**Protesta universitaria de integridad y honestidad
académica y profesional
(Titulación o graduación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado:

Antropología virtual: variación morfológica de los senos esfenoidales para identificación humana en población mexicana

que presenté para obtener el título/grado de licenciado en ciencia forense, es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi entidad académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación/graduación.

Atentamente

Nombre: ORTEGA ALBOR JOEL ARMANDO
Fecha: 20 de febrero de 2024
Número de cuenta: 315040010

(Nombre, firma, fecha y número de cuenta de la persona alumna)

ÍNDICE

ÍNDICE.....	VI
Capítulo I. Introducción.....	1
<i>Planteamiento del problema</i>	1
<i>Justificación</i>	3
<i>Objetivo general</i>	3
<i>Objetivos específicos</i>	4
<i>Hipótesis</i>	4
Capítulo II. Fundamento teórico	5
<i>Antropología virtual</i>	5
Técnicas de imagenología médica: Tomografía computarizada (CT)	7
Segmentación	9
Técnicas de segmentación.....	10
<i>Senos esfenoidales</i>	11
Anatomía, función y desarrollo.....	12
Relevancia en el ámbito forense	13
Estudios en materia de identificación humana e identificación personal (individualización)	15
<i>Enfoque morfoscópico</i>	15
<i>Enfoque morfométrico</i>	17
<i>Morfometría geométrica</i>	20
<i>Landmarks</i>	21
<i>Tipos de landmarks</i>	22
Análisis generalizado de Procrustes (GPA).....	23
Morfometría de alta densidad (<i>high-density morphometrics</i>).....	24
<i>Estadística multivariada</i>	27
Regresión múltiple multivariada.....	28
Análisis de componentes principales (PCA).....	29
<i>Análisis de coordenadas principales (PCoA)</i>	30
Análisis de conglomerados (CA).....	30
Estadístico de Procrustes (PROTEST).....	33
Capítulo III. Metodología	34
<i>Muestra</i>	34
<i>Diseño del estudio</i>	36

Segmentación y renderizado tridimensional de los senos esfenoidales	37
Protocolo automático de digitalización de <i>landmarks</i> por <i>high-density morphometrics</i> (<i>Automated Landmarking through Point cloud Alignment and Correspondence Analysis</i> o ALPACA).....	38
<i>Análisis generalizado de Procrustes (GPA)</i>	39
<i>Análisis generalizado de Procrustes de superficie (Generalized Procrustes Surface Analysis</i> o GPSA)	40
<i>Análisis de componentes principales (PCA)</i>	40
<i>Análisis de conglomerados (CA)</i>	40
<i>Regresión múltiple multivariada</i>	41
<i>Estadístico de Procrustes (PROTEST)</i>	41
<i>Diseño experimental</i>	41
Capítulo IV. Resultados.....	45
ALPACA.....	45
<i>Análisis de componentes principales (PCA)</i>	45
<i>Sin repeticiones</i>	45
<i>Con repeticiones</i>	52
<i>Análisis de conglomerados (CA)</i>	57
<i>Sin repeticiones</i>	57
<i>Con repeticiones</i>	57
GPSA.....	58
<i>Análisis de coordenadas principales (PCoA)</i>	58
<i>Sin repeticiones</i>	58
<i>Con repeticiones</i>	59
<i>Análisis de componentes principales (PCA)</i>	60
<i>Sin repeticiones</i>	60
Empleando la forma media como modelo de referencia.....	66
Anidación de la muestra en senos esfenoidales bilaterales.....	71
Anidación de la muestra en senos esfenoidales unilaterales.....	77
Exploración de grupos por sexo.....	83
Exploración de grupos por edad.....	86
Exploración de grupos por lateralidad	89
Exploración de grupos por población	92
<i>Con repeticiones</i>	95
Empleando la forma media como modelo de referencia.....	99

Análisis de conglomerados (CA)	103
<i>Sin repeticiones</i>	103
Empleando la forma media como modelo de referencia.....	103
Anidación de la muestra en senos esfenoidales bilaterales	104
Anidación de la muestra en senos esfenoidales unilaterales.....	104
<i>Con repeticiones</i>	105
Empleando la forma media como modelo de referencia.....	106
Regresión múltiple multivariada.....	106
Estadístico de Procrustes (PROTEST).....	109
Capítulo V. Discusión	110
<i>Consideraciones y limitaciones</i>	131
<i>Protocolo de trabajo</i>	141
Capítulo VI. Conclusiones	143
Referencias.....	146
Anexos	167
<i>Gráficos desglosados de los análisis de conglomerados (CA)</i>	167

Capítulo I. Introducción

La muerte no es una destrucción completa, al menos inmediata, sino una especie de desaparición.

—Georges Raynaud, Teatro indígena prehispánico (Rabinal Achí)

Planteamiento del problema

La presente tesis busca caracterizar la morfología de los senos esfenoidales para su uso en la práctica forense, aplicando morfometría geométrica y estadística multivariada. Lo anterior parte de que la mayoría de las investigaciones sólo se han centrado en estudiar los senos frontales, a pesar del gran potencial de los demás senos paranasales para individualización. Las ventajas de emplear los senos esfenoidales incluyen su buena preservación en contextos traumáticos y frente a alteraciones por altas temperaturas, su aparición durante los tres primeros años de vida y su protección de la degradación por causas externas, debido a que son el par más posterior de los senos paranasales y están localizados cerca del centro de la base craneal. Además, estudios sobre la variación craneofacial los han descrito como una neumatización muy variable, para la unicidad anatómica y respecto de su variabilidad poblacional, mediante técnicas de superposición y evaluación de reconstrucciones 3D (Auffret *et al.*, 2016; Cappella *et al.*, 2019).

Un punto innovador será la aplicación de la antropología virtual, definida por Weber y Bookstein (2011) como un enfoque multidisciplinario para estudiar datos anatómicos en tres o cuatro dimensiones, dentro de un entorno informático. La antropología virtual, con apoyo de la imagenología, permite generar métodos indirectos de análisis, utilizando modelos anatómicos 3D que pueden ser compartidos y estudiados, sin suponer un riesgo para los restos humanos y sin la necesidad de interactuar con ellos manualmente. Por otro lado, se ha demostrado que estos modelos 3D, reconstruidos de tomografías computarizadas, sirven para generar datos que describen de manera más íntegra la estructura de interés, a diferencia de los obtenidos a través de radiografías u otras técnicas bidimensionales o 2D, donde la cantidad de información espacial se encuentra reducida y limitada (Robles, Morgan, *et al.*, 2020).

En el contexto de un cuerpo bien preservado o alrededor de una etapa temprana de descomposición, el DNA, los dientes y las huellas dactilares se consideran aproximaciones primarias de identificación, mientras que el estudio de las características antropométricas y

rasgos anatómicos entran en juego durante etapas más avanzadas de putrefacción o ante la degradación continua (Souadhi *et al.*, 2020; Tuang *et al.*, 2023). Además, hablando en particular de la dactiloscopia y por medio del uso de redes neuronales, se ha propuesto que las huellas dactilares de diferentes dedos de una misma persona pueden compartir ciertas similitudes, sobre todo en la orientación de las crestas que se encuentran más cerca del centro; por lo que estos hallazgos retan las creencias más longevas en cuanto a la utilidad individualizante de las huellas dactilares (Guo *et al.*, 2024). Es aquí donde la utilización de los senos esfenoidales puede ser una gran alternativa a las asunciones dogmáticas y métodos clásicos que resultan caros, están limitados a las condiciones del medio y/o requieren técnicas invasivas y comparativas que consumen mucho tiempo.

Por otra parte, la pneumatización de los senos esfenoidales progresa con la edad en una dirección inferior posterolateral, observándose en grados variables, asociándose con estructuras neurovasculares vitales y estableciendo distintos sistemas de clasificación, de acuerdo con el tipo de pneumatización y en rangos que van desde la ausencia o escasez a la hiperextensión más allá de la superficie basal del hueso esfenoidal (a veces involucrando a los procesos clinoides anteriores y posteriores, las alas esfenoidales grandes y menores, el proceso pterigoideo y sus láminas, así como el interior del *clivus*) (Hai-Yan *et al.*, 2023; Tuang *et al.*, 2023).

Estas premisas contribuyen a que la variación extrema en grados y disparidades direccionales de los senos esfenoidales, sumadas a la posición inconsistente del *septum* esfenoidal, apoyen a la identificación radiológica, sobre todo cuando no existen registros dentales, muestras de DNA o huellas dactilares; la tomografía computarizada facilita la evaluación craneofacial de los huesos y la extensión de las pneumatizaciones, siendo un método de imagenología excelente para el estudio anatómico de los senos esfenoidales y su aplicación forense, tanto en individuos con vida como sin vida (Auffret *et al.*, 2016; Cappella *et al.*, 2019; Dong *et al.*, 2022; Hai-Yan *et al.*, 2023). Por tanto, el objetivo del trabajo es probar su validación para los rangos de variabilidad en población mexicana, ya que el proceso de historia biológica local puede ser un elemento importante por considerar en la identificación humana.

Finalmente, la presente tesis integrará una metodología con valor probatorio, con base en el estándar Daubert y en el reporte del *Committee on Identifying the Needs of the*

Forensic Sciences Community, del *National Research Council*, que en conjunto establecen un modelo para la admisión de la evidencia científica en el procedimiento penal (Committee on Identifying the Needs of the Forensic Sciences Community (CINFSC) & National Research Council (NRC), 2009).

Justificación

En México, de acuerdo con la Comisión Nacional de Búsqueda (CNB) (2021), hay más de 110,000 personas desaparecidas y no localizadas. Con este antecedente, la presente tesis contribuirá al enfoque multidisciplinario de los procesos de identificación humana, cuyos análisis a menudo son costosos, consumen tiempo, requieren métodos y técnicas destructivas o invasivas, o bien, a veces se ven limitados por las condiciones de los elementos de estudio; por ejemplo, cuando se trabaja con restos humanos fragmentados o incinerados (Comité Internacional de la Cruz Roja (CICR), 2010).

El desarrollo de nuevos métodos y bases de datos libres, son elementos que ayudarán a mitigar la emergencia forense. En atención a este punto, el Movimiento por nuestros Desaparecidos en México (2021) ha reportado que las bases de datos existentes en el país son subutilizadas, rudimentarias, incompletas, poco actualizadas y pobremente interconectadas a nivel estatal y federal. En su mayoría, estas bases de datos son de orden genético, dactiloscópico y pocas contienen registros odontológicos. Por tanto, se aportará información que sea útil para la práctica antropológica forense, así como para coadyuvar en los estudios realizados por los especialistas de los servicios periciales, pues el propio gobierno ha establecido que, al mes, muchos de los estados identifican menos del 20% de los cadáveres que ingresan.

Objetivo general

Caracterizar la variación morfológica de los senos esfenoidales en una muestra de 348 individuos mexicanos, empleando técnicas de antropología virtual, morfometría geométrica y estadística multivariada, para la determinación de su unicidad y su utilidad en relación con otras variables en el marco de la identificación humana dentro de contextos forenses.

Objetivos específicos

1. Generar las segmentaciones y los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales de la base de datos de tomografías del Hospital General de México, misma que ha sido cedida al Laboratorio de Antropología y Odontología Forense para investigación.
2. Fenotipar un protocolo de 100 *semilandmarks* por *High-Density Morphometrics* (Goswami *et al.*, 2019) para los senos esfenoidales.
3. Determinar el patrón de individualización y/o unicidad de los senos esfenoidales para su uso forense en identificación humana, aplicando un modelo de biodistancias fenotípicas por estadística multivariada: análisis de componentes principales y clúster.
4. Establecer si existen diferencias significativas de la forma tridimensional de los senos esfenoidales en función de variables como la edad, la población, el sexo, el tamaño, el volumen y la lateralidad, aplicando análisis de componentes principales como técnica exploratoria y regresión múltiple multivariada como técnica inferencial.
5. Incorporar bases de datos 3D a partir de los resultados obtenidos en los senos esfenoidales, para su uso en la *praxis* forense de la identificación humana.

Hipótesis

El análisis del morfoespacio de los senos esfenoidales mostrará una varianza fenotípica amplia, lo que permitirá, mediante el cálculo de distancias entre cada par de individuos en la muestra, generar un dendograma donde se observará un patrón de distancias fenotípicas grande y porcentajes de agrupamiento por debajo del intervalo de distancias mínimas.

Capítulo II. Fundamento teórico

Todo esto era sacado, era recogido de entre el agua, era rebuscado cuidadosamente. Unos buscaban con las manos, otros buscaban con los pies.

—Informantes de Sahagún, Códice Florentino (versión de Ángel Ma. Garibay K.)

Antropología virtual

La antropología virtual es un campo multidisciplinario que tiene como propósito el estudio de datos anatómicos y biológicos, agrupando diversas técnicas de captura de datos (como la imagenología médica o la fotografía científica) que, en conjunto con la flexibilidad y versatilidad de los entornos informáticos (Figura 1), facilitan la creación y manipulación de modelos tridimensionales, lo cual representa una ventaja frente al manejo de objetos o estructuras físicas, ya que también permite explorar y generar nuevas líneas de investigación a través de la segmentación de estructuras internas, sin limitarse sólo a estructuras externas o superficiales (Weber & Bookstein, 2011).

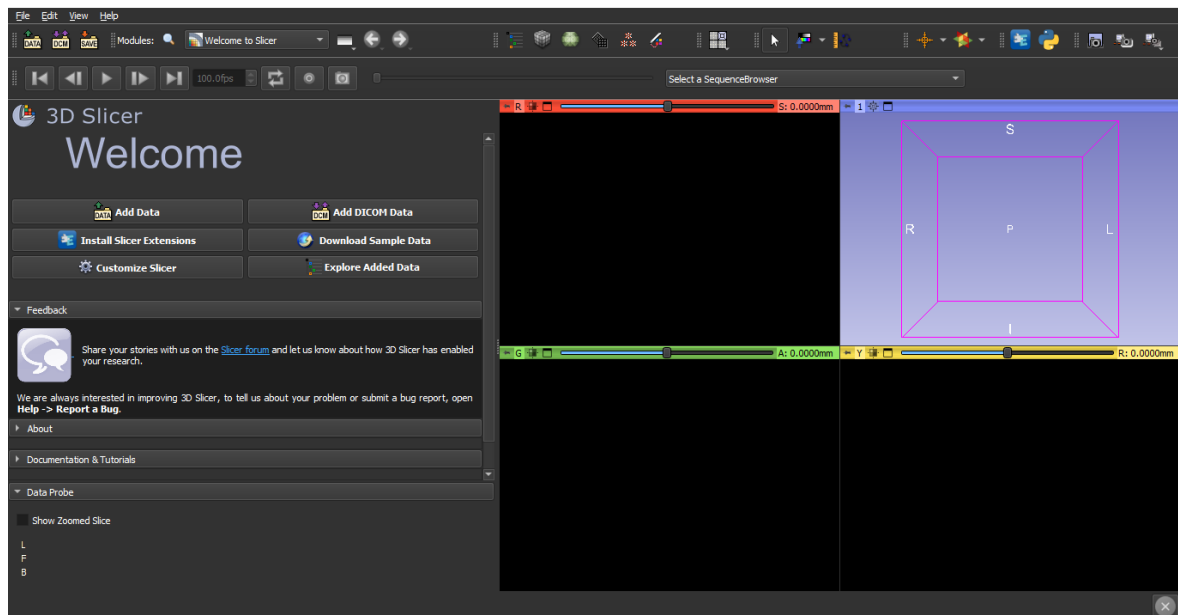


Figura 1. *Software 3D Slicer* en ejecución, ejemplo de una plataforma de trabajo que ofrece un entorno informático útil para antropología virtual.

La antropología virtual se constituye de seis áreas principales en su protocolo, que son las siguientes: 1) digitalizar, 2) exponer, 3) comparar, 4) reconstruir, 5) materializar y 6) compartir. La digitalización implica procesar los objetos reales para importarlos a un entorno informático (como un equipo de cómputo). La exposición permite observar estructuras internas que serían de difícil acceso en los objetos reales. La comparación funge

un papel importante para cuantificar diferencias morfológicas entre las superficies. La reconstrucción sirve para el tratamiento de datos parciales y/o perdidos y volverlos reproducibles con base en resultados de trabajo previo. La materialización es la contraparte de la digitalización, proporcionando métodos para trasladar los objetos virtuales a la realidad (por ejemplo, a través de la impresión). Finalmente, la compartición amplia los horizontes de la antropología virtual, por medio de la participación y colaboración grupal, donde la comunidad tiene la oportunidad de transmitir datos entre sí (Bagga *et al.*, 2019; Weber, 2014).

Los métodos de adquisición de datos de la antropología virtual son variados, cuyo rango de herramientas y técnicas van desde la pura obtención de coordenadas de *landmarks* (a través de digitalizadores y equipos mecánicos) hasta la aplicación de escáneres de superficie, fotogrametría e imagenología médica. Dependiendo del tipo de estudio o investigación, es útil conocer la taxonomía de los métodos de captura, que, en el caso de superficies externas, se divide principalmente en dos: 1) escáneres activos y 2) escáneres pasivos. Los escáneres activos funcionan como una fuente de emisión de luz que permite capturar el objeto; estos escáneres agrupan dos técnicas: 1) láser y 2) luz estructurada. Los sistemas láser transmiten luz mapeada sobre la superficie, donde el reflejo es obtenido por un detector, triangulando y creando nubes de puntos para reproducir la morfología del objeto. Los sistemas de luz estructurada utilizan una cámara en conjunto con el escáner, con el propósito de agregar color a la nube de puntos; la luz se proyecta como un plano sobre una tabla calibrada con formas de dimensiones conocidas, permitiendo que el objeto sea digitalizado por medio del registro del patrón y los cambios geométricos detectados en relación con la calibración previa. Por otro lado, los métodos pasivos desempeñan el papel contrario, actuando como receptores de la luz transmitida por el entorno u otras fuentes externas, y empleando imagenología estereoscópica y fotogrametría para registrar la forma del objeto, así como otras propiedades —como la textura—. En la Figura 2 se muestran dos ejemplos de captura de datos: 1) escáner láser y 2) fotogrametría (Errickson *et al.*, 2017; Silvester & Hillson, 2020).

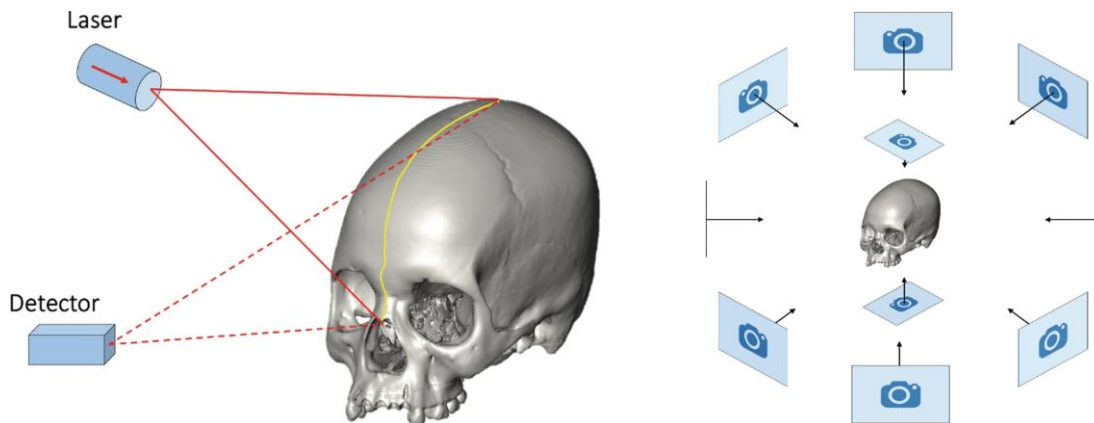


Figura 2. Izquierda: esquema de los principios de un escáner láser, donde una única línea de luz se proyecta sobre la superficie para ser reflejada y recibida por un detector; esto se repite desde diferentes ángulos hasta capturar todo el objeto. Derecha: construcción de un modelo fotogramétrico, donde las imágenes son obtenidas alrededor del objeto desde al menos dos perspectivas (Landi & O’Higgins, 2019).

Dentro de esta gama de métodos hay que destacar las técnicas de imagenología médica que, a diferencia de los métodos activos y pasivos de escaneo, tienen la ventaja de registrar datos volumétricos internos, sin limitarse solamente a datos superficiales (Carew *et al.*, 2019; Franklin *et al.*, 2016).

Técnicas de imagenología médica: Tomografía computarizada (CT)

La tomografía computarizada, desarrollada a principios de 1970 por el ingeniero eléctrico Godfrey N. Hounsfield, es una técnica sin contacto, no invasiva y no destructiva, que puede emplearse tanto para individuos vivos como sin vida. Esta técnica no sólo ha cobrado gran relevancia en el ámbito médico, sino que se ha vuelto ampliamente utilizada en investigaciones científicas e industriales, debido a que el escaneo por tomografía computarizada resulta en una matriz tridimensional que engloba pequeñas unidades de información denominadas *voxels* (análogos a los píxeles bidimensionales que podría tener una radiografía convencional), auxiliando en la generación de imágenes de alta resolución (Figura 3), cuyos cortes pueden convertirse en modelos tridimensionales, por medio del renderizado de superficie (que produce polígonos para representar características detalladas) o renderizado de volumen (para la reconstrucción de estructuras externas e internas) (Hu *et al.*, 2020; Omari *et al.*, 2020; Tsaklakis, 2022; Weber *et al.*, 2001).

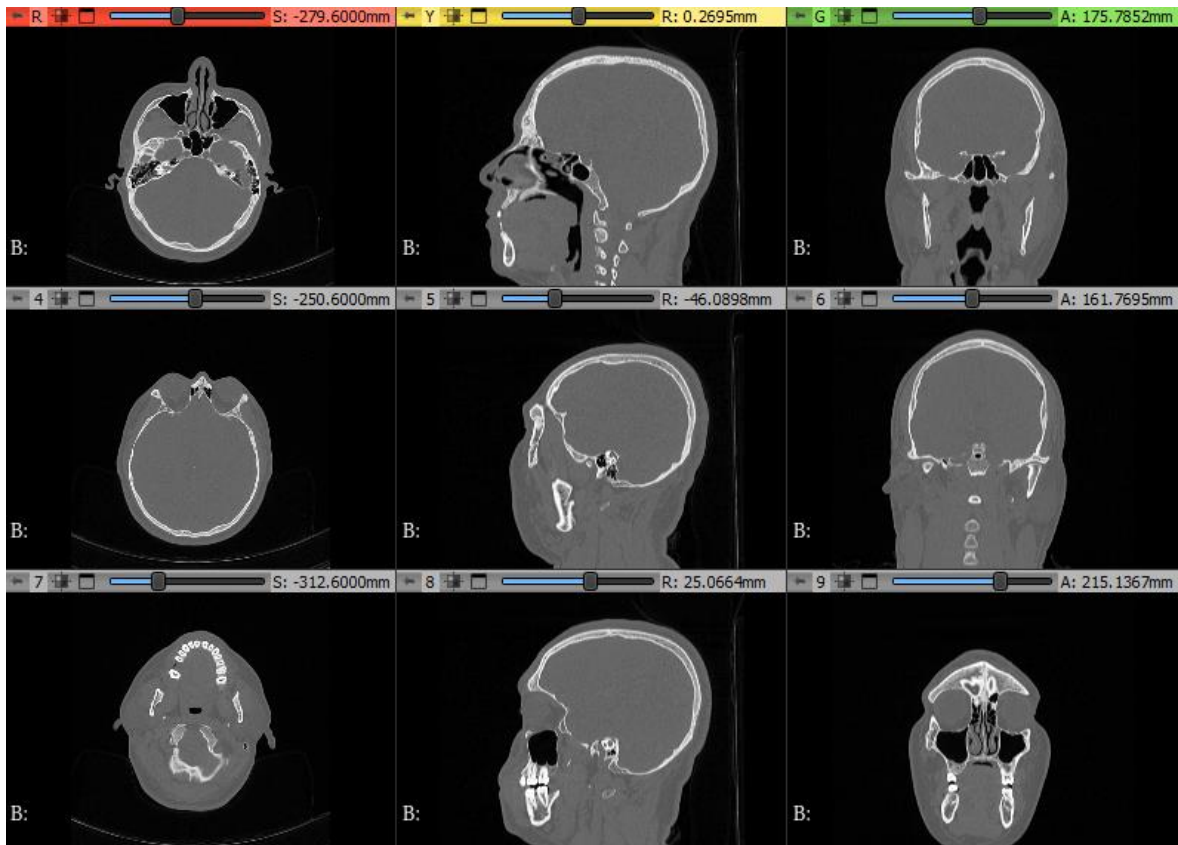


Figura 3. Variedad de cortes de una misma tomografía computarizada visualizada en sus tres planos: axial (rojo), coronal (verde) y sagital (amarillo).

La CT emplea un arreglo de fotoreceptores que detectan diferencias en la atenuación de los rayos X. En su sentido análogo, esta forma de energía ionizante se expone ante una película sensible de haluro de plata, dejando granos de plata reducida en el lugar donde los fotones percuten; después, estos puntos negros microscópicos se acumulan en el sitio donde haya mayores rayos X transmitidos en la película, mientras que son escasos e incluso ausentes en zonas donde el cuerpo interpuesto absorbe la radiación, dispersándose en una escala de grises en relación con el número atómico del tejido incidente. En un escáner de CT, los rayos X (emitidos por un tubo rotatorio) pasan a través del cuerpo realizando múltiples recorridos diametrales sobre un plano axial o transversal (de ahí la técnica adquiere su nombre tradicional, *tomografía axial computarizada*). Con la instrumentación adecuada, es posible convertir la imagen análoga a una digital de modo directo, lo cual permite modificar parámetros en la imagen como el contraste, el rango de densidad, la inversión blanco/negro y la optimización de borde. A pesar de que la imagen análoga tiene mayor resolución espacial que la imagen digital, la resolución de contraste

máxima es necesaria para beneficiarse de dicha resolución espacial, y los distintos tonos de gris no son fáciles de separar. En la actualidad, los tomógrafos pueden producir más de 256 cortes de tejido de manera simultánea (como la unidad del Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez en México), alcanzando salidas rápidas, cortes más delgados, resolución más fina y reconstrucciones virtuales fidedignas (Brogdon, 2011; Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez, 2021; Tsaklakis, 2022).

Segmentación

La segmentación, en su significado más básico, hace alusión al proceso de separación virtual de una estructura específica en relación con sus estructuras vecinas, para ser tratada y analizada como una unidad independiente (Weber & Bookstein, 2011). Este proceso involucra la colocación de características definidas a cada elemento de imagen (llámese píxel o *voxel*), dependiendo de su valor en escala de grises y/o su posición (ya sea proveniente de datos por CT u otra técnica imagenológica), agrupando los elementos de imagen adyacentes que comparten dichas características. Así, un segmento está determinado bajo un criterio de homogeneidad, establecido por valores de escala de grises similares o por un perímetro común delimitado, por lo que cada segmento debe encontrarse conectado, completo y claro en sentido espacial con otros. El resultado de la segmentación es un grupo de regiones delineadas que convergen en un único conjunto de datos, con frecuencia presentado como un objeto visual (Fedorov *et al.*, 2012; Hu *et al.*, 2020; Weber & Bookstein, 2011).

La identificación de los elementos de imagen mencionados –pertenecientes a una misma región o estructura–, el coloreado de los *voxels* de interés y los contornos de delimitación pueden realizarse de modo manual, aunque esto en la práctica implique el uso de una gran cantidad de datos y un gran consumo de tiempo, por lo que también existen diferentes técnicas y procesos automatizados basados en ajustes parametrizados. Al mismo tiempo, las segmentaciones automatizadas no suelen ser perfectas, por lo que se necesita la sinergia entre las herramientas automáticas y la supervisión del observador, lidiando con procesos intermedios, o bien, adoptando un enfoque de segmentación semiautomático, que combina lo mejor de ambas perspectivas. En la actualidad, se han desarrollado productos comerciales y herramientas de *software* especializadas que aprovechan distintas propiedades en las estructuras, como su densidad o sus ya mencionados valores en escala

de grises (comúnmente asociados a las unidades Hounsfield), para poder llevar a cabo una segmentación ideal de las mismas, a partir de procedimientos basados en histogramas, bordes, regiones, imágenes, modelos, texturas, conjuntos de niveles, aprendizaje activo y profundo, entre otros (Fedorov *et al.*, 2012; Velazquez *et al.*, 2013; Weber & Bookstein, 2011).

Técnicas de segmentación

Las principales técnicas de segmentación para la producción de modelos tridimensionales a partir de tomografías computarizadas se pueden dividir en tres: 1) manuales, 2) semiautomáticas y 3) automáticas. Las técnicas de segmentación manuales implican una interacción directa por parte del usuario u observador y requieren de instrucción para trabajar corte por corte en los diferentes planos que componen una tomografía computarizada (axial, coronal y sagital), así mismo, requieren de competencia anatómica para identificar no sólo el fenotipo de interés, sino sus delimitaciones con otras estructuras adyacentes (la Figura 4 presenta un ejemplo de segmentación). Las técnicas de segmentación semiautomáticas también advierten la interacción del observador con la tomografía computarizada, pero facilitan y reducen el tiempo del proceso al contar con diferentes opciones de apoyo computacional, como la utilización de “semillas” que se colocan sobre la estructura de interés y aumentan en tamaño hasta abarcarla por completo; otros protocolos emplean el crecimiento de región basado en intensidad, donde se “colorean” *voxels* vecinos que cumplen con un umbral específico de intensidad; por otro lado, la transformación por línea divisoria separa las regiones que difieren en gran medida en sus valores de escala de grises. Las técnicas automáticas tienen el propósito de aminorar la interacción directa y, en la actualidad, se busca implementar enfoques fundamentados en el aprendizaje profundo y la inteligencia artificial, entrenando máquinas con grandes bases de datos para generar modelos que sean capaces de segmentar estructuras anatómicas sin intervención humana. El mayor alcance de este tipo de técnicas, hasta el momento, permiten reconstruir estructuras a través de renderizados de volumen completos, pero sin adaptarse de modo adecuado y diferencial a fenotipos complejos. Sin embargo, tanto las técnicas semiautomáticas como automáticas siguen necesitando de supervisión del observador, dado que con frecuencia tienen conflictos para detectar bordes, introducen ruido en el modelo y no se ajustan con exactitud al área que desea segmentarse, por tanto,

mientras continúa la evolución tecnológica de estas herramientas, las segmentaciones resultantes deben ser revisadas y refinadas manualmente a lo largo del flujo de trabajo (Dastidar *et al.*, 1999; Gibelli, Cellina, Gibelli, Oliva, Codari, *et al.*, 2017; Gibelli *et al.*, 2019; Pimer *et al.*, 2009; Salah *et al.*, 2005; Tingelhoff *et al.*, 2007; Wallner *et al.*, 2019; Wen *et al.*, 2022).

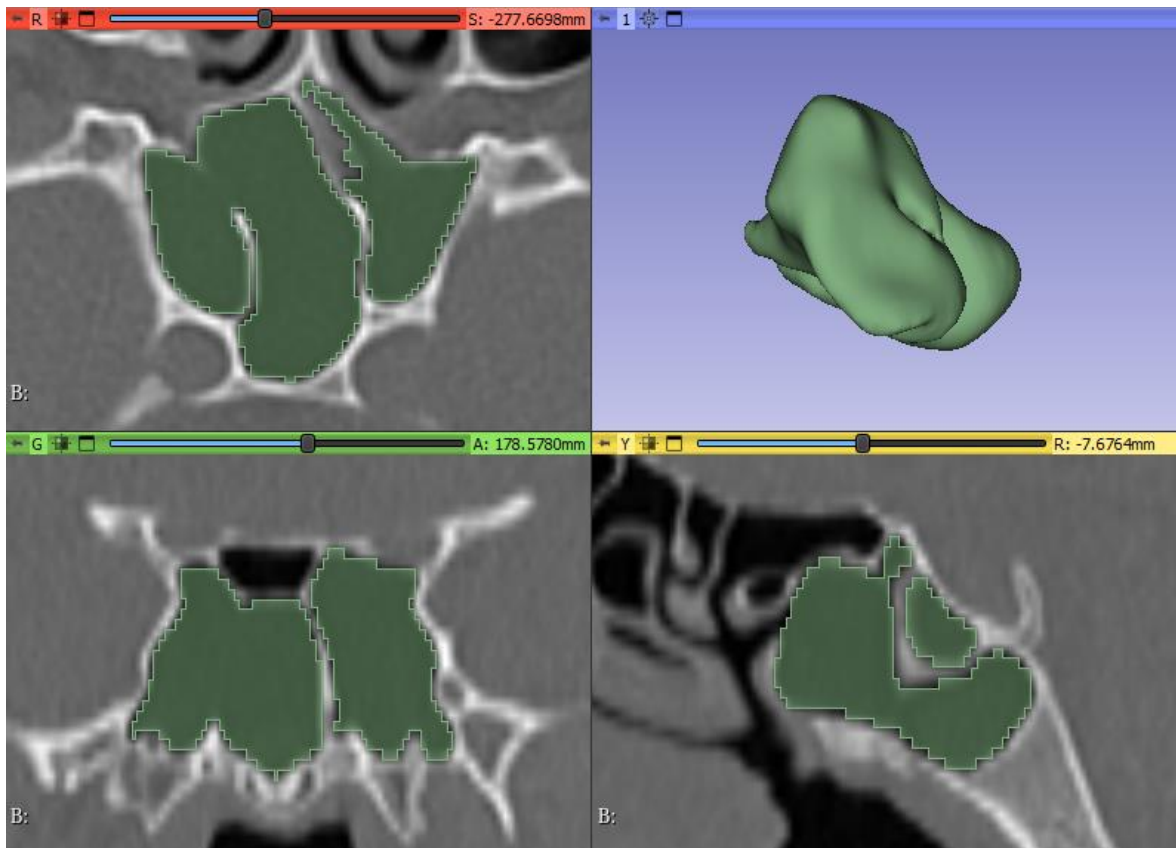


Figura 4. Ejemplo de segmentación de senos esfenoidales (verde) y renderizado tridimensional del modelo ya generado (vista superior derecha).

Senos esfenoidales

Los senos esfenoidales forman parte del grupo de los senos paranasales (Figura 5), que son pneumatizaciones o cavidades compuestas de aire denominados caracteres o fenotipos únicos del cráneo y que derivan sus nombres de acuerdo con el hueso que los contiene (frontal, etmoides, maxilar y esfenoides) (Barros *et al.*, 2021; Tortora & Derrickson, 2020).

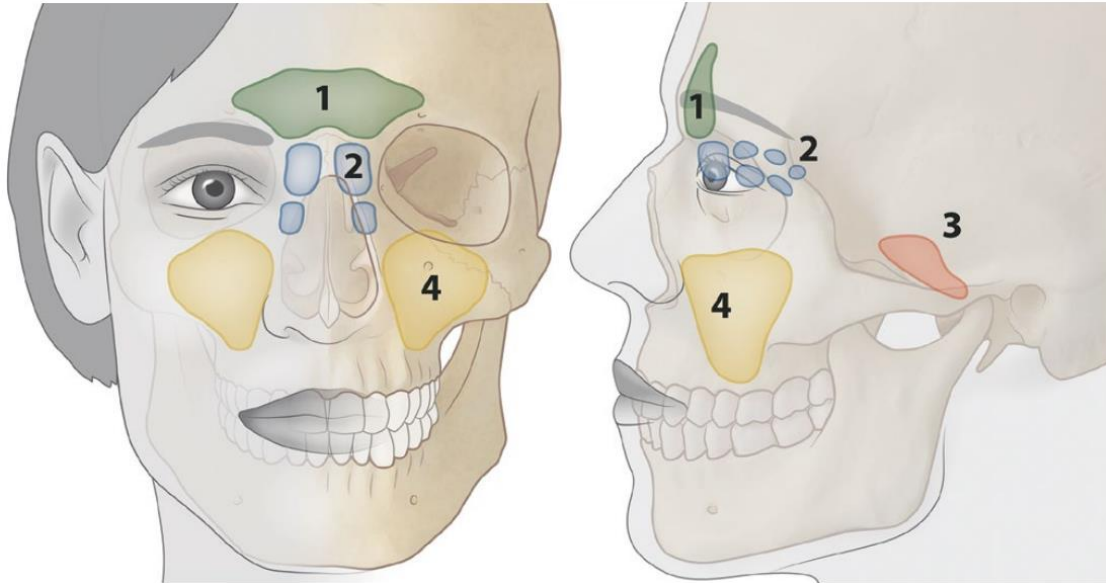


Figura 5. Senos paranasales: 1) senos frontales, 2) senos etmoidales, 3) senos esfenoidales y 4) senos maxilares. Adaptación esquemática de Schwerzmann *et al.* (2022).

Anatomía, función y desarrollo

En específico, los senos esfenoidales se localizan en lo profundo del centro de la base craneal (contenidos por el hueso esfenoides). Cumplen diversas funciones, principalmente dentro del sistema respiratorio: en la dinámica del paso del aire, en el drenaje de secreciones hacia la cavidad nasal, en la neutralización de impactos o lesiones, permiten el crecimiento del cráneo (evitando cambios en su masa ósea) y el crecimiento armónico del rostro, además, sirven como cámaras de resonancia para mejorar la calidad de la voz e intensificar y prolongar los sonidos (Barros *et al.*, 2021; Tortora & Derrickson, 2020).

Su desarrollo comienza a partir del tercer mes de gestación y son pequeños e incluso ausentes en el nacimiento, siendo visibles por imagenología hasta el tercer o cuarto año de vida, finalizando su formación entre los 12 y 14 años. Una clasificación radiológica del desarrollo de la pneumatización se muestra en la Figura 6, dividida en cuatro grados: A) primitiva, sin pneumatización visible en el esfenoides; B) conchal, pneumatización en la porción anterior del esfenoides, pero no más allá del plano esfenoidal; C) preesfenoidal, pneumatización confinada dentro de la región preesfenoidal, donde el borde superoposterior se puede extender a la pared anterior de la silla turca pero no más allá, y D) basiesfenoidal, en la que la pneumatización se extiende hacia el basiesfenoides. De aquí se destacan dos periodos de crecimiento importantes (ocurridos en el agrandamiento facial):

uno durante la erupción dental (alrededor de los seis meses) y otro en la pubertad (Barros *et al.*, 2021; Fujioka & Young, 1978; Tortora & Derrickson, 2020; Vaid & Vaid, 2015).

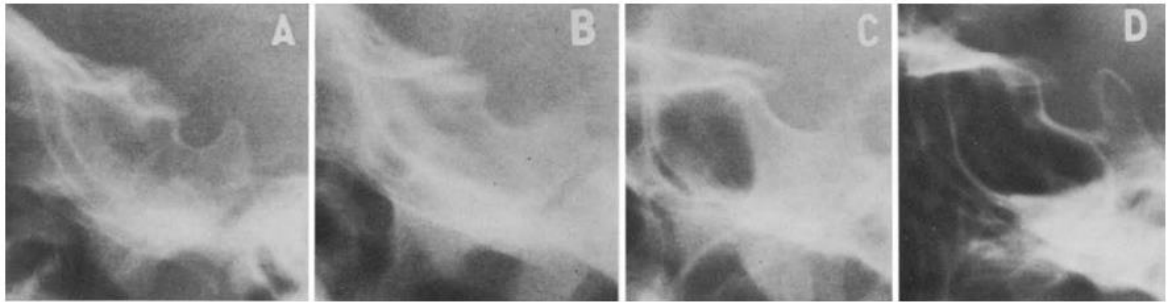


Figura 6. Grados de pneumatización de los senos esfenoidales según Fujioka & Young (1978): A) primitivo, B) conchal, C) preesfenoidal y D) basiesfenoidal.

Relevancia en el ámbito forense

Los senos esfenoidales muestran características relevantes (en parte gracias a su posición posterior), ya que están menos expuestos al fuego, a alteraciones por altas temperaturas y pueden preservarse y mantenerse inafectados aún ante fracturas craneales, también estando protegidos de la degradación traumática y por causas externas (Auffret *et al.*, 2016; Cappella *et al.*, 2019; Deloire *et al.*, 2019).

Respecto a su variabilidad biológica, diversos estudios han reportado diferencias anatómicas en los senos esfenoidales, presentando una gran variación inter e intrapoblacional (plasticidad fenotípica) y, por consiguiente, amplia heterogeneidad morfológica, aspecto que puede visualizarse en la Figura 7 (Abdulghani, 2021; Degaga *et al.*, 2020; Gibelli, Cellina, Gibelli, Oliva, Termine, *et al.*, 2017; Hiremath *et al.*, 2018; Keast *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2012; Öksüzler *et al.*, 2019; Onwuchekwa & Alazigha, 2017; Park *et al.*, 2010; Pigliucci, 2001; Ramos *et al.*, 2021; Treviño-Gonzalez *et al.*, 2021).

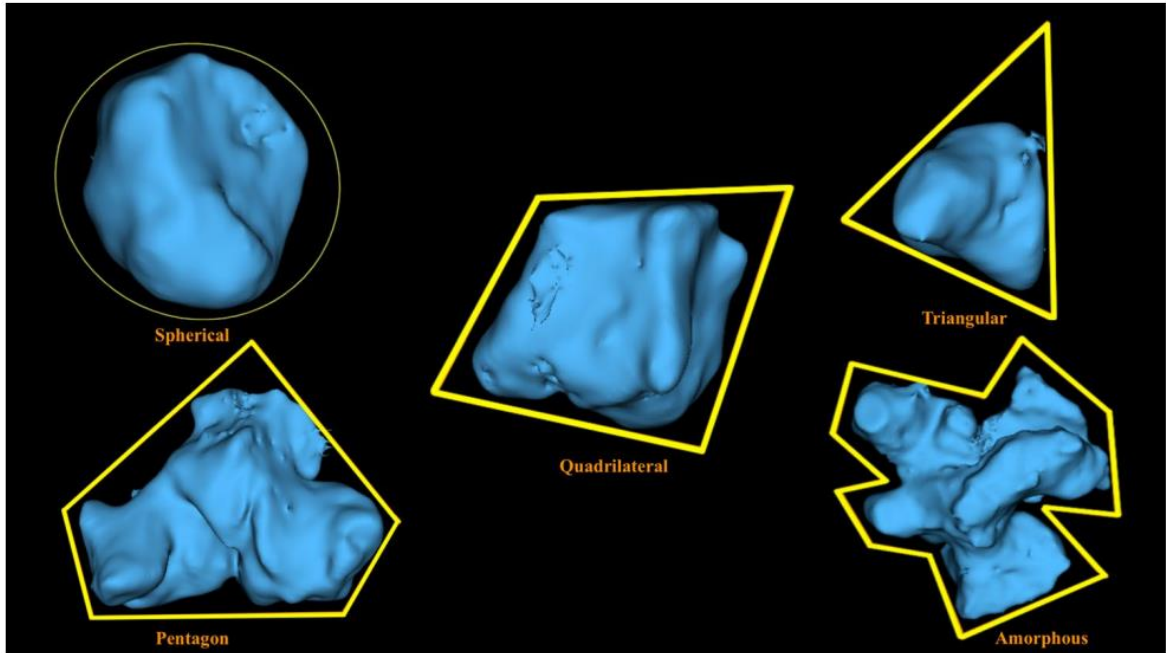


Figura 7. Clasificación de los senos esfenoidales de acuerdo con la forma y las categorías definidas por Singh *et al.* (2021): esférica, pentagonal, cuadrilateral, triangular y amorfa.

En este sentido, la pneumatización de los senos esfenoidales ha sido bastante bien documentada, variando en su forma, dimensiones, direcciones y grados, con frecuencia presentando una alta asimetría. Así mismo, pueden existir senos esfenoidales uni o bilaterales, es decir, dos hemisenos (izquierdo y derecho) que se encuentran separados por un *septum* interesfenoidal; esta estructura también cuenta con una distinguible variabilidad, como se observa en la Figura 8. Los senos bilaterales son los que suelen mostrar mayor asimetría (Auffret *et al.*, 2016; Cappella *et al.*, 2019; Deloire *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2021).

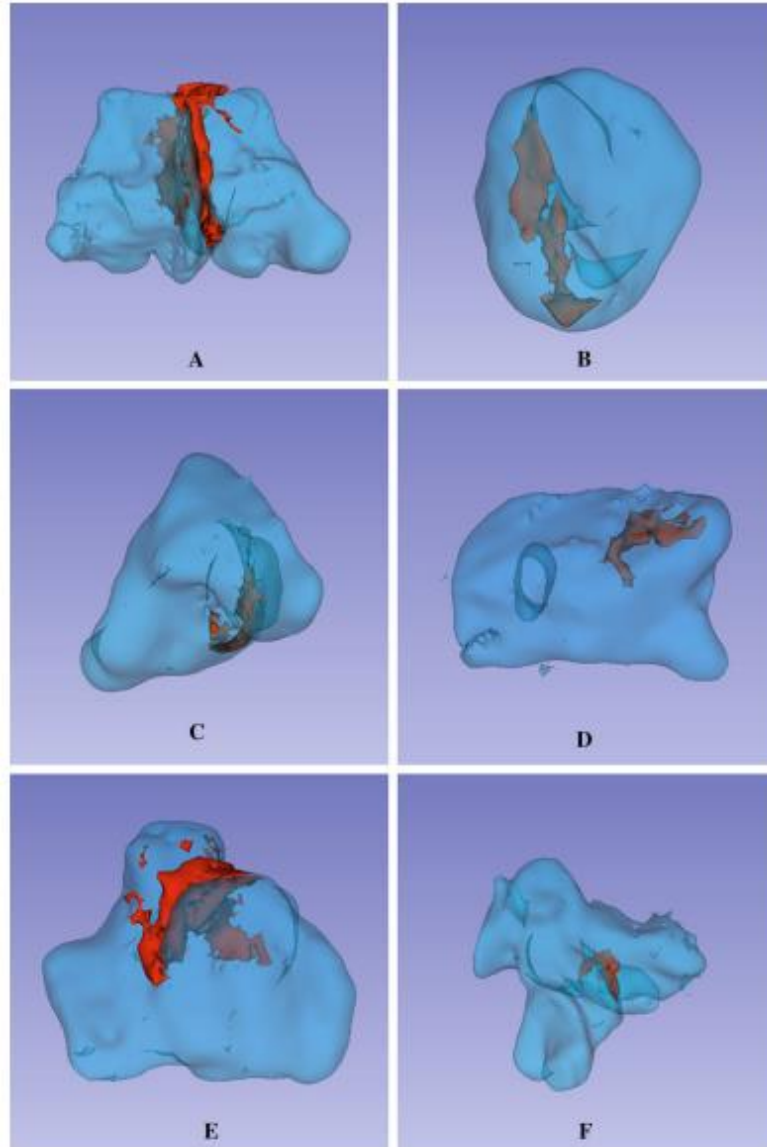


Figura 8. Diferentes tipos de *septum* en senos esfenoidales de acuerdo con Singh *et al.* (2021). *Septums* (rojo) y distintas formas de senos esfenoidales (azul): A) senos bilaterales con *septum* interseno, B) senos con forma esférica, C) triangular, D) cuadrilateral, E) pentagonal y F) amorfa. De B a F son senos unilaterales con *septum* intraseno.

Estudios en materia de identificación humana e identificación personal (individualización)

Enfoque morfoscópico

La mayoría de las investigaciones que han empleado los senos esfenoidales (y los senos paranasales en general) se han centrado en aplicar un enfoque morfoscópico, descriptivo y clasificatorio; por ejemplo, agrupando las variantes anatómicas de los senos esfenoidales en distintas clases y documentando las características de estructuras adyacentes al

endofenotipo (Ahmadipour *et al.*, 2016; Christensen & Hatch, 2018; Rajagopal *et al.*, 2020; Treviño-Gonzalez *et al.*, 2021; Vaid & Vaid, 2015; Wei *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2015).

Una de las clasificaciones más utilizadas en la literatura médica divide a los senos esfenoidales en cuatro grupos principales, de acuerdo con su pneumatización observable en la Figura 9: 1) conchal, 2) preselar, 3) selar y 4) postselar. El primer grupo se refiere a senos esfenoidales con una pneumatización mínima o que están ausentes por completo. La segunda clase agrupa a los senos esfenoidales cuya pneumatización y pared posterior termina frente de la pared anterior de la silla turca. El tercer tipo indica que la pneumatización de los senos esfenoidales finaliza entre la pared anterior y la pared posterior de la silla turca. Por último, los senos esfenoidales de categoría postselar exhiben una pneumatización que se extiende más allá de la silla turca, es decir, la pared posterior de los senos está detrás de la pared posterior de la silla turca. Como esta, hay diversas clasificaciones, mismas que también se han llegado a subdividir en ramas más particulares, pero que no dejan de lado su carácter visual y subjetivo, aunque artículos como el de Auffret *et al.* (2016) han reportado una precisión de identificación del 100% a través de estas metodologías y los estudios derivados de los senos paranasales y/o estructuras adyacentes (Abdullah *et al.*, 2018; Alam-Eldeen *et al.*, 2018; Blatt & Michael, 2020; Deloire *et al.*, 2019; Mohebbi *et al.*, 2017; Treviño-Gonzalez *et al.*, 2021).

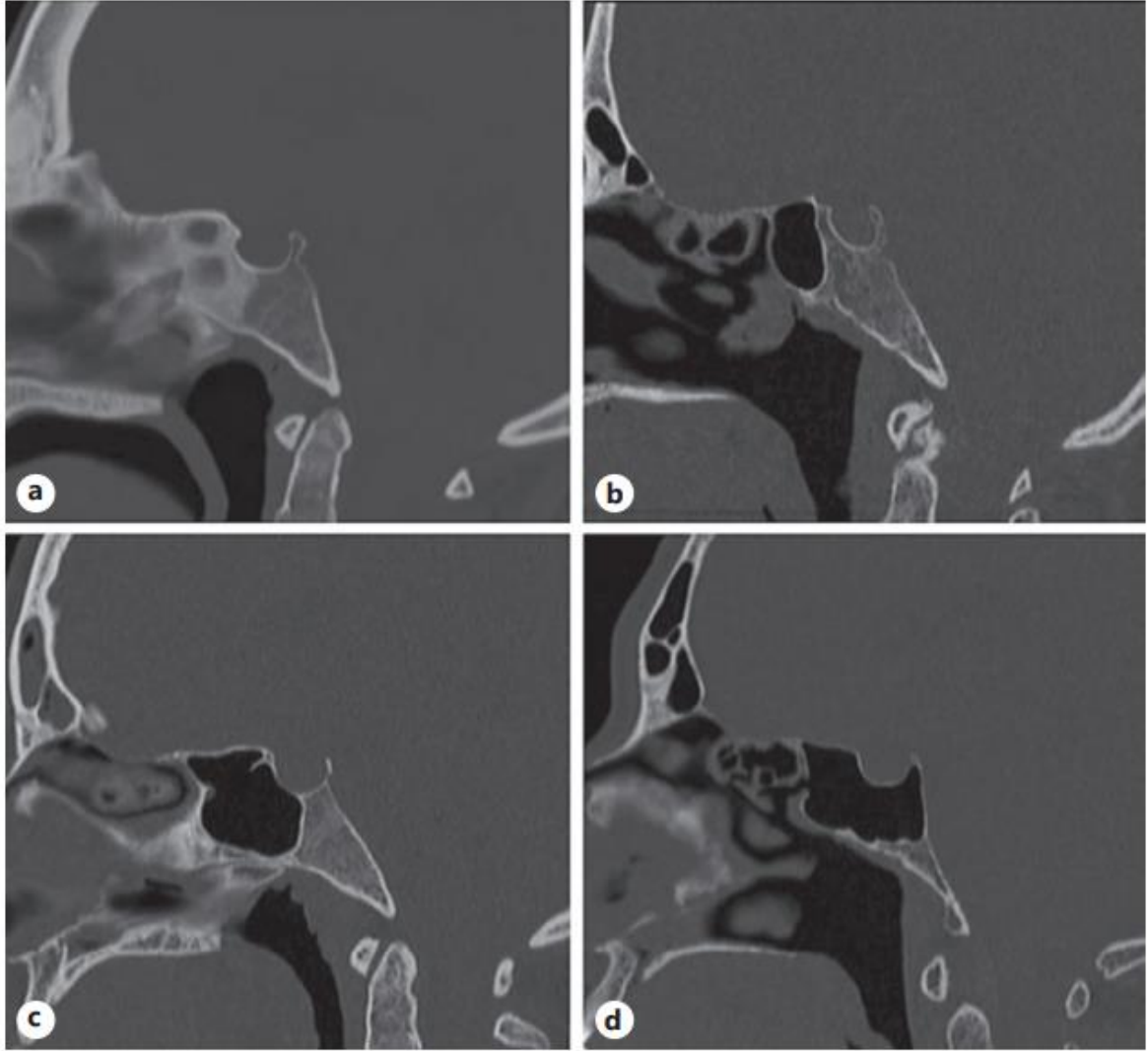


Figura 9. Tipología morfoscóptica frecuente de los senos esfenoidales: a) conchal, b) preselar, c) selar y d) postselar (Treviño-Gonzalez *et al.*, 2021).

Enfoque morfométrico

Los estudios con enfoque morfométrico particularmente han empleado mediciones lineales bidimensionales en los senos esfenoidales, tomando como referencia planos anatómicos en radiografías o cortes tomográficos individuales (Figura 10). Por otro lado, en la perspectiva tridimensional, también se han realizado mediciones lineales, volumétricas y superposiciones uno a uno entre modelos, no obstante, este tipo de técnicas han resultado limitativas para tratar con tamaños de muestra y bases de datos grandes, causando que el flujo de trabajo consuma largos periodos de tiempo (Gibelli, Cellina, Gibelli, Oliva, Codari, *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2010; Ramos *et al.*, 2021).

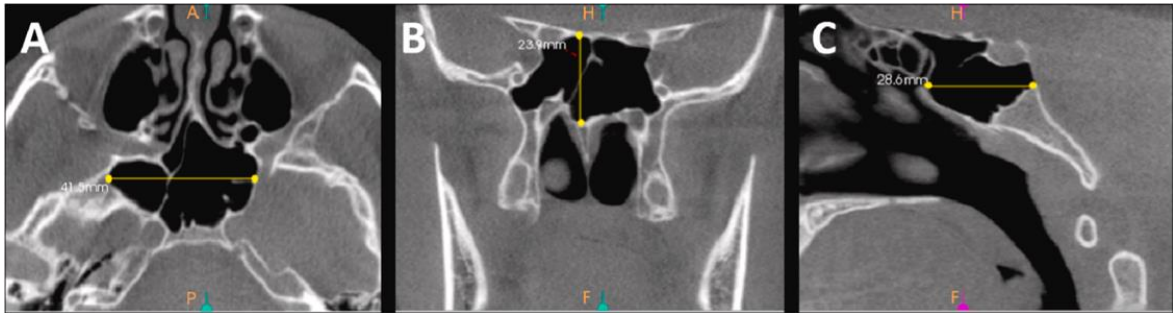


Figura 10. Mediciones lineales en los senos esfenoidales: A) distancia más larga laterolateral, B) distancia más larga inferosuperior y C) distancia más larga anteroposterior (Ramos *et al.*, 2021).

Estudios como el de Robles, Morgan, *et al.* (2020) y Robles, Rando, *et al.* (2020), en contraparte, han generado modelos tridimensionales de los senos paranasales para su aplicación en antropología forense (Figura 11), sobre todo para el apoyo en la constitución del perfil biológico (estimación de la edad, el sexo y la ancestría); para el caso de los senos esfenoidales, las mediciones realizadas de tamaño y forma no demostraron resultados discriminantes para la determinación del perfil biológico. Sin embargo, dentro de su metodología se encuentra la conversión de estos modelos a imágenes 2D (Figura 12), con el objetivo de llevar a cabo mediciones lineales y obtener las coordenadas x , y de los contornos de las estructuras (para transformarlas en coeficientes elípticos de Fourier). Al final, este enfoque de nuevo termina reduciendo la información tridimensional a bidimensional.

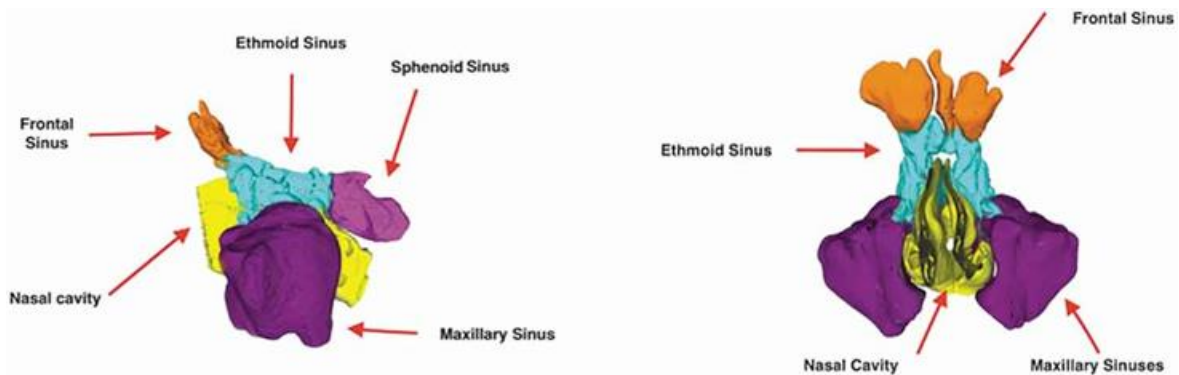


Figura 11. Modelos tridimensionales de los senos paranasales (Robles, Morgan, *et al.*, 2020).

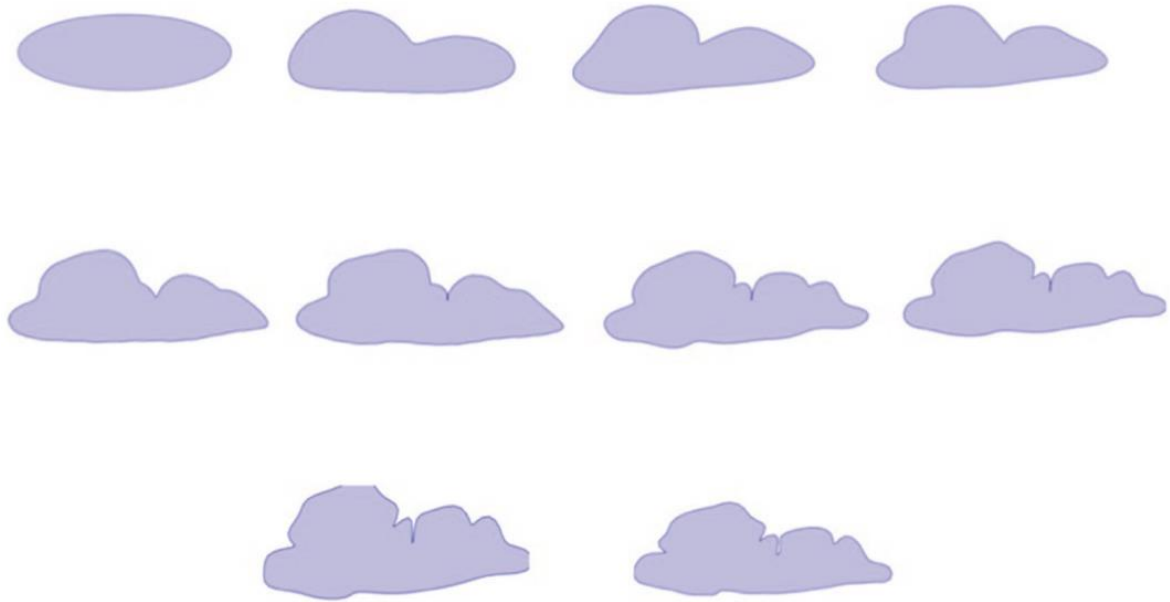


Figura 12. Armónicos que definen el desarrollo del contorno de los senos frontales (Robles, Rando, *et al.*, 2020).

Una aproximación cercana a la morfometría geométrica ha sido reportada por Landi & O’Higgins (2019), quienes han propuesto el uso de modelos anatómicos 3D para estudiar aspectos morfológicos relacionados con la ontogenia. Para ello, emplearon modelos craneales tridimensionales que cubrieron con *landmarks* y *semilandmarks* en regiones externas e internas del rostro, la base y la bóveda craneal. Además, hicieron uso de seis *landmarks* en la superficie de cada seno maxilar derecho (Figura 13); para superar la restricción de homología anatómica, cinco *landmarks* de tipo II se definieron con base en el plano de Frankfurt (más lateral, inferior, superior, anterior y posterior), más un *landmark* de tipo I, colocado en el *ostium*. Investigaciones como esta tesis no se han desarrollado para los senos esfenoidales, además, persiste la problemática de cobertura, considerando que seis *landmarks* no serían suficientes para caracterizar toda la estructura tridimensional, al haber regiones faltantes de *landmarks*.

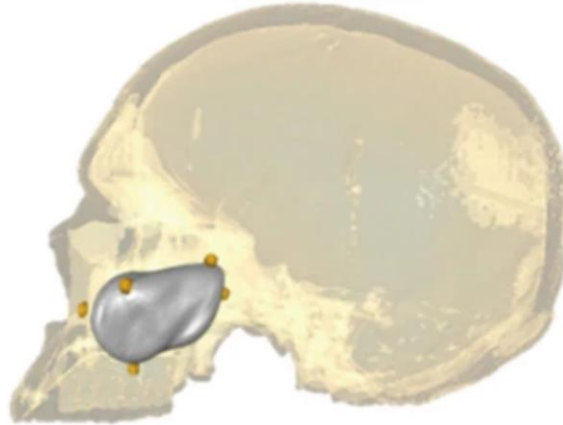


Figura 13. Protocolo de *landmarks* en el seno maxilar derecho (Landi & O'Higgins, 2019).

Morfometría geométrica

De acuerdo con Zelditch *et al.* (2012), la morfometría geométrica es una rama de la estadística y la morfología que se encarga del análisis cuantitativo de la forma (*shape*), incluyendo los procesos biológicos que los conforman.

Este enfoque engloba investigaciones sobre las diferencias y variaciones de la forma entre individuos, así como sus causas y transformaciones. Contrario a los estudios cualitativos en morfología, algunas de las ventajas de la morfometría geométrica implican mediciones más precisas que el uso de analogías y descripciones subjetivas, así como la aplicación de herramientas estadísticas que permiten la visualización, interpretación y comunicación de los hallazgos y resultados (útiles para la comparación, explicación e ilustración de las diferencias de forma en distintas estructuras y fenotipos), con el propósito de responder cuestiones de índole biológico, derivando en otras ramas como la anatomía y la antropología (Landi & O'Higgins, 2019; Zelditch *et al.*, 2012).

Landi y O'Higgins (2019) mencionan que la geometría de un objeto es su forma, misma que puede ser descrita empleando coordenadas de *landmarks*, puntos anatómicos que deben corresponder a la misma significancia evolutiva, funcional u ontogénica en la estructura que se pretende estudiar. Para ello, Bookstein (1991) propone cuatro principios presentes en el trabajo morfométrico (Figura 14): 1) caracterizar la forma biológica por medio de la colocación de puntos o *landmarks*, 2) convertir estos conjuntos de *landmarks* en coordenadas de forma (o variables de forma, bajo un sentido estadístico), 3) procesar estas variables a través de tratamientos por estadística multivariada, y 4) interpretar los hallazgos en el plano visual o espacio de los datos.

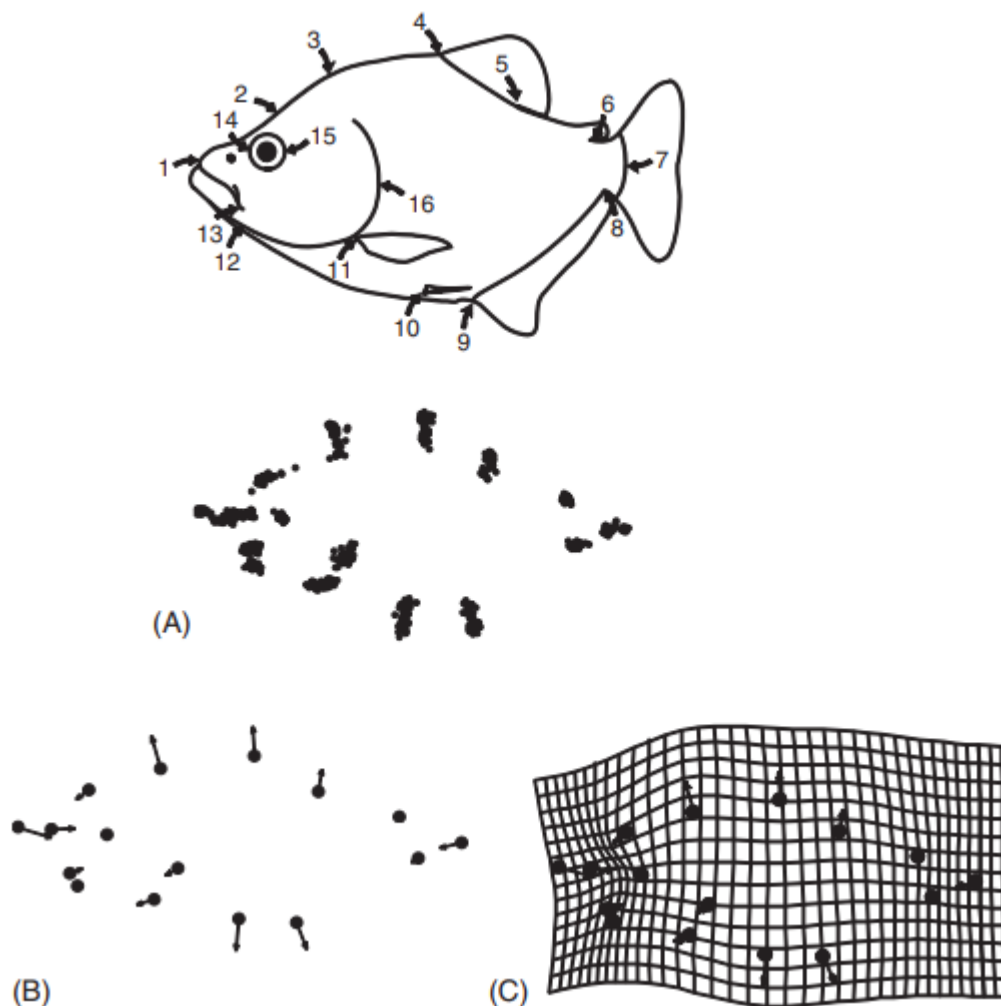


Figura 14. Procedimiento básico de morfometría geométrica por Zelditch *et al.* (2004): (A) caracterización de la forma por medio de *landmarks*, (B) variables de forma que indican el desplazamiento relativo de cada *landmark* entre individuos, y (C) procesamiento de los datos por estadística multivariada que muestra la variación morfológica a través de una grilla de transformación.

Landmarks

Los *landmarks*, en su sentido biológico y matemático, son puntos anatómicos discretos, homólogos y con correspondencia dentro y entre poblaciones. Para esto, Zelditch *et al.* (2012) definen tres criterios esenciales que debe cumplir la elección de *landmarks* sobre un fenotipo: 1) ser anatómicamente homólogos, lo que significa que cada punto sobre un individuo debe corresponder al *mismo* punto en toda la muestra de individuos, 2) proveer una apropiada cobertura de la forma, colocando *landmarks* en regiones relevantes, en particular aquellas donde se pretenda levantar información y detectar cambios morfológicos, 3) encontrarse de manera repetible y confiable, es decir, que sean fáciles de

identificar múltiples veces, para así reducir el error de medición (Arnqvist & Mårtensson, 1998; Fruciano, 2016).

Existen otros dos criterios que pueden mencionarse, el primero se relaciona con la consistencia en la posición de los *landmarks*, por lo cual no deben cambiar su ubicación relativa con otro, algo que puede suceder cuando se encuentran muy cerca entre sí; el segundo criterio adicional se asocia con la coplanaridad de los puntos, es decir, que, para estudios bidimensionales, todos los *landmarks* deben colocarse sobre un mismo plano o vista anatómica. Cada configuración de *landmarks* se considera un dato único para cada espécimen o individuo (Zelditch *et al.*, 2012).

Tipos de landmarks

La clasificación clásica de Bookstein (1991) divide a los *landmarks* en tres tipos principales: 1) tipo I, yuxtaposiciones discretas de tejido (suturas o puntos de bifurcación), 2) tipo II, curvaturas máximas o procesos morfogénicos locales (puntas de extrusiones o valles de invaginaciones), y 3) tipo III, puntos extremos (localizaciones separadas de manera finita). De acuerdo con estas clases, para Zelditch *et al.* (2012) los *landmarks* de tipo I se consideran ideales u óptimos, los de tipo II son ligeramente más problemáticos y los de tipo III ni siquiera deberían denominarse *landmarks* como tal, por lo que su utilización depende de cómo se definan de modo local y la manera en la que pretendan construirse.

En este sentido, los *semilandmarks* son puntos que sirven para capturar información de regiones complejas como bordes, curvaturas o superficies (en estructuras tridimensionales). Los *semilandmarks* se diferencian de los *landmarks* en tres aspectos principales: 1) no son homólogos, 2) no son discretos y 3) su posición suele ser arbitraria y, en la mayoría de los casos, está definida por otros *landmarks*, aunque existen técnicas como el *sliding* o deslizamiento que permiten ajustar su posición y lidiar estadísticamente con este problema —por medio de la distancia de Procrustes o la energía de torsión— (Landi & O’Higgins, 2019; Rolfe, Davis, *et al.*, 2021; Zelditch *et al.*, 2012).

Por otro lado, los *pseudolandmarks* son puntos colocados o proyectados automáticamente y densamente sobre la superficie tridimensional de estructuras (obtenidas a través de modelos renderizados de tomografías computarizadas, escáneres o fotogrametría). Estos puntos pueden o no tener relación con *landmarks* colocados de modo manual y permiten

ampliar el criterio de homología, al generar correspondencia en su muestreo entre individuos, además, simplifican el tiempo computacional y de trabajo en general. La Figura 15 presenta un ejemplo de protocolo de distintos tipos *landmarks* colocados sobre un cráneo humano (Boyer *et al.*, 2015; Landi & O’Higgins, 2019; Rolfe, Pieper, *et al.*, 2021).

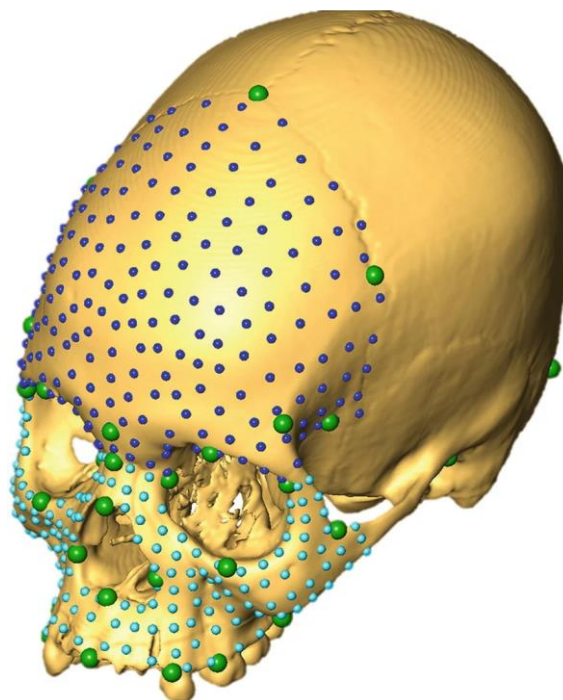


Figura 15. Protocolo de *landmarks* en un cráneo humano: en color verde *landmarks* de tipo I y II, en color azul turquesa/marino *semilandmarks* y *pseudolandmarks* (Landi & O’Higgins, 2019).

Análisis generalizado de Procrustes (GPA)

Es el núcleo de la mayoría de los estudios en morfometría geométrica y el cual permite convertir las coordenadas de *landmarks* en coordenadas o variables de forma. Esta técnica minimiza las discrepancias entre las formas de los individuos y las homogeniza a través de la estimación de una forma media, superponiendo todas las configuraciones de *landmarks* a ella (razón por la cual también se le conoce por el término simple de superposición de Procrustes). Esta superposición se fundamenta en la combinación de tres criterios geométricos (Figura 16): 1) escalamiento, 2) traslación y 3) orientación (Bookstein, 1991; Landi & O’Higgins, 2019).

El primer proceso (escalamiento) se constituye al estandarizar el tamaño de la muestra a *centroid size* 1; el *centroid size* se define como la raíz cuadrada de la suma de distancias cuadradas de cada *landmark*, distancias que se calculan a partir del centroide de

la configuración completa. En el segundo proceso (traslación), las configuraciones de los individuos se superponen a la media aritmética de todas las coordenadas de *landmarks*, sustrayendo las coordenadas de sus centroides y llevando su posición al origen. Finalmente, durante el tercer proceso (orientación) se selecciona una configuración de referencia a la cual se van a alinear las demás, haciendo que cada una de ellas rote sobre el ángulo que minimice las distancias al cuadrado sumadas de los *landmarks* homólogos entre individuos. En síntesis, la supresión de los efectos por escala, traslación y orientación permite extraer la pura información geométrica (variables de forma) que se halla contenida en la configuración de *landmarks*, especialmente en ausencia de alometría (Landi & O'Higgins, 2019; Zelditch *et al.*, 2012).

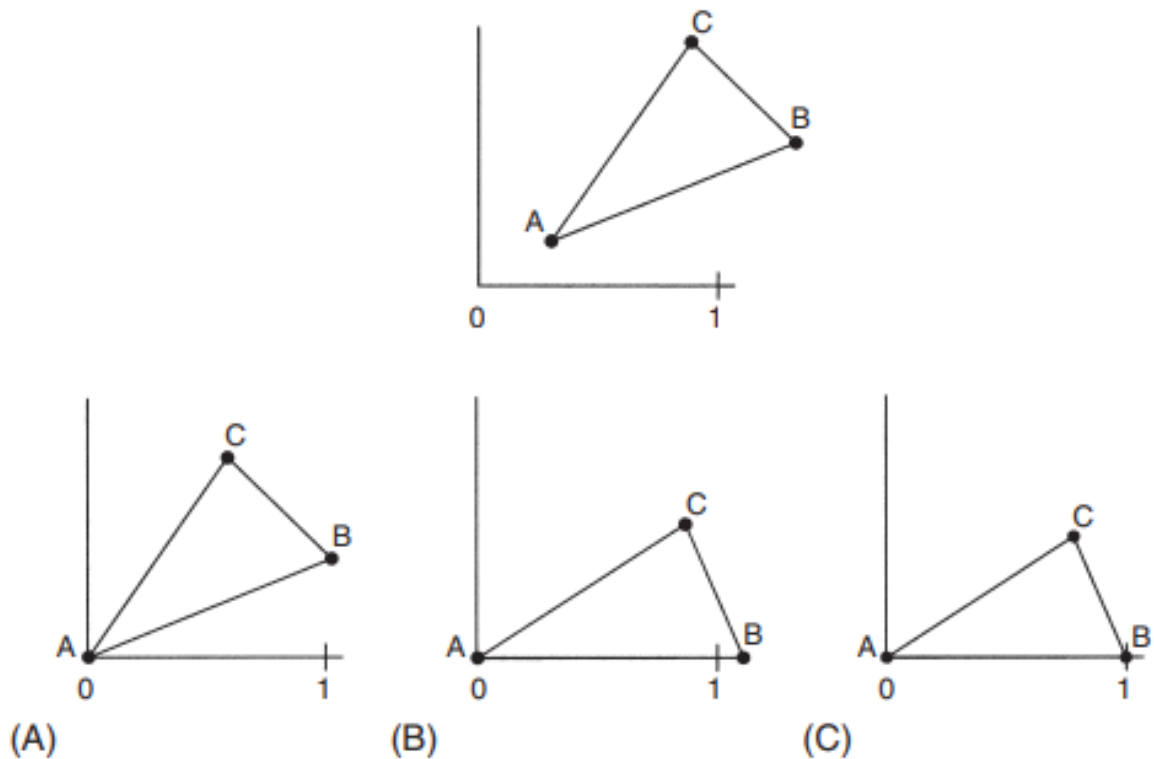


Figura 16. Las tres operaciones geométricas que no alteran la forma: (A) traslación, (B) rotación y (C) escalamiento (Zelditch *et al.*, 2004).

Morfometría de alta densidad (*high-density morphometrics*)

Es un enfoque empleado en biología para cuantificar la variación morfológica continua a través del uso de una gran cantidad de mediciones o datos (Cardini, 2020; Goswami *et al.*, 2019).

En tiempos recientes ha crecido su desarrollo dentro de la morfometría geométrica, haciendo uso de grandes conjuntos de datos compuestos por *landmarks*, *semilandmarks* y *pseudolandmarks* para estudios morfológicos. Retomando a Bardua *et al.* (2019), este aumento en la cantidad de bases de datos de carácter tridimensional ha creado la necesidad de desarrollar nuevos métodos para capturar toda la complejidad de estructuras biológicas, datos de alta densidad que suelen excluirse al emplear *landmarks* tradicionales.

Debido a las limitaciones, ha sido difícil caracterizar y cuantificar de manera clara y precisa la morfología de organismos, donde el uso de *landmarks* discretos ha generado dos restricciones principales: 1) los *landmarks* están acotados en número gracias a la necesidad de contar con homología biológica (lo que reduce la información obtenible de regiones ausentes de puntos), y 2) los *landmarks* tradicionales fallan en representar la forma *entre ellos*, por ejemplo, en curvaturas y superficies. Para curvaturas, se ha optado por emplear *semilandmarks* que capturen la información presente entre los *landmarks* discretos; por otro lado, para las superficies se han implementado métodos usando mallas de *pseudolandmarks* o incluso métodos libres de *landmarks* (Boyer *et al.*, 2015; Dryden & Mardia, 2016; Rolfe, Pieper, *et al.*, 2021).

Algunas de las técnicas que utilizan *pseudolandmarks* se basan en la creación de nubes de puntos, a partir de los modelos o *meshes* renderizados de tomografías computarizadas o escaneos de superficie; posteriormente, estas nubes de puntos se someten a un análisis generalizado de Procrustes. Dos grandes ventajas de este tipo de métodos implican reducir la subjetividad en la digitalización de *landmarks* y disminuir el tiempo de obtención de datos morfométricos. Sin embargo, imposibilitan la colocación de puntos en regiones definidas bajo un sentido biológico y pueden no tener una correspondencia anatómica equivalente (Boyer *et al.*, 2015; Cardini, 2020; Rolfe, Pieper, *et al.*, 2021; Toussaint *et al.*, 2021).

Los *semilandmarks* ofrecen una especie de término medio entre *landmarks* clásicos y *pseudolandmarks*, al poder caracterizar regiones compuestas por ambos grupos, lo cual mantiene y mejora la comparabilidad entre individuos. Estas técnicas, como se ha mencionado, permiten un ajuste a través de la minimización de la energía de torsión o la distancia de Procrustes, produciendo una homología geométrica en los *semilandmarks*. Ciertos tipos de *semilandmarks* incluyen curvas que definen contornos o márgenes,

mientras que los *semilandmarks* de superficie capturan información entre *landmarks* y curvas, generando parches sobre el espacio delimitado por estos —como los huesos que comprenden la bóveda craneal— (Boyer *et al.*, 2015; Rolfe, Pieper, *et al.*, 2021; Toussaint *et al.*, 2021).

La digitalización de *landmarks*, *semilandmarks* y *pseudolandmarks* puede dividirse en tres clases: 1) manual, 2) semiautomática y 3) automática. La digitalización manual es la más tradicional y se constituye de la colocación de puntos anatómicos en aquellas regiones que son de interés en la estructura o el fenotipo (algunas curvas también se pueden definir manualmente desde un inicio). La digitalización semiautomática suele implicar la proyección de *landmarks* en los individuos con base en una plantilla, compuesta de los *landmarks* colocados de modo manual o empleando un modelo de referencia. En ambos casos, lo que hace la plantilla es tratar de adaptarse a la forma de cada espécimen. La digitalización automática también puede o no requerir de una plantilla, no obstante, la colocación de *landmarks* de forma previa se puede volver prescindible, por ejemplo, cuando se trabaja con nubes de puntos completas o por medio de algoritmos que le facilitan al investigador o investigadora muestrear el número de *pseudolandmarks*, teniendo en cuenta los parámetros que ellos determinen; por otro lado, los métodos automáticos libres de *landmarks* disponen del *mesh* de referencia para muestrear las coordenadas de los vértices de los demás individuos a lo largo de la muestra. La figura 17 sintetiza los conceptos de este apartado, mostrando ejemplos de morfometría de alta densidad (Bardua *et al.*, 2019; Boyer *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2018; Goswami *et al.*, 2019; Porto *et al.*, 2021; Rolfe, Pieper, *et al.*, 2021).

En años recientes, se ha estado en boga el uso de técnicas que no requieran el registro de *landmarks* para la captura de fenotipos (en inglés, métodos denominados *landmark-free*), considerando los atributos y las propiedades físicas y biológicas de estructuras y formas más complejas e irregulares. Ante esta situación, Pomidor *et al.* (2016) presenta un novedoso enfoque llamado análisis generalizado de Procrustes de superficie (GPSA) que involucra la utilización de superficies escaneadas o renderizados tridimensionales, en lugar de *landmarks*, para calcular diferencias en la forma (combinando el análisis generalizado de Procrustes y el algoritmo iterativo de punto más cercano). Esta perspectiva permite el estudio de superficies con una clara falta de correspondencia de

landmarks, aproximándose a una homología por medio de la asociación de puntos entre una superficie y otra, de acuerdo con su punto vecinal más cercano, minimizando el costo en la función del cálculo de sus distancias. Dado que este cálculo se realiza por pares de superficies, para aumentar la capacidad analítica del método en una muestra grande de individuos, se designa una superficie prototipo o modelo base que sirva para promediar cada una de las posiciones de los puntos vecinales; esta superficie prototipo debe ser la más completa, representativa y menos atípica, hablando en un sentido morfométrico (Ege *et al.*, 2020; Thomas *et al.*, 2023).

Con este enfoque se pueden obtener dos series de datos: 1) la métrica de Procrustes de superficie y 2) las coordenadas homologadas de los vértices de las superficies (análogas a la distancia de Procrustes y las coordenadas de Procrustes, respectivamente). El segundo conjunto de datos puede emplearse para análisis por técnicas de estadística multivariada justo como se realizarían con las coordenadas de Procrustes (por ejemplo, análisis de componentes principales, regresión de la forma contra otras variables o pruebas para diferencias entre grupos). Además, la varianza en las superficies puede mapearse con colores asignados al prototipo, creando un mapa de calor tridimensional representativo de la variación dentro de una muestra (Horstmann *et al.*, 2018; Pomidor *et al.*, 2016).

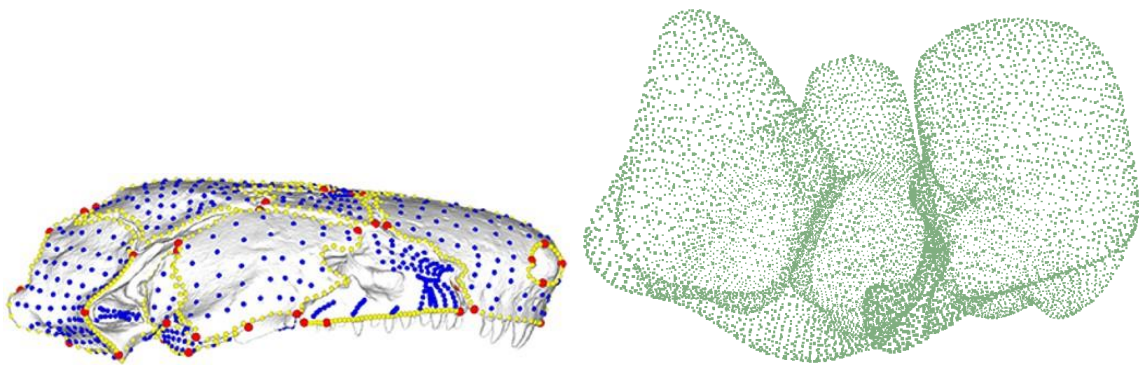


Figura 17. Morfometría de alta densidad. Izquierda (cráneo): *Landmarks* (rojo), *semilandmarks* (amarillo), y *pseudolandmarks* (azul), extraído de Bardua *et al.* (2019). Derecha (senos esfenoidales): Puntos (verde) que conforman los vértices del *mesh*.

Estadística multivariada

Para Anderson (2003), la estadística multivariada involucra el tratamiento de variables que están relacionadas entre sí, con base en conjuntos de mediciones a partir de un número de individuos u objetos. Las mediciones realizadas sobre un individuo o espécimen se agrupan en un vector de columna, el cual simboliza una sola observación. Estas observaciones en

todos los especímenes u objetos constituyen una muestra de vectores, donde un conjunto de datos compuesto por k variables (siendo $k > 1$) se define como multivariado (Zelteman, 2015). A su vez, estos vectores conforman lo que se denomina una matriz de observaciones (muchas veces representando a cada individuo como una fila, para facilitar las operaciones algebraicas).

Dentro del análisis de la forma, las metodologías de análisis multivariado han existido para tratar de responder cuestionamientos biológicos desde hace más de 75 años, aproximadamente. Este precedente ha venido acompañado de distintos problemas prácticos, como tamaños de muestras pequeños, pero con una gran cantidad de variables, lo que se traduce en inconvenientes por alta dimensionalidad y bajos números muestrales; por esta razón, uno de los objetivos principales de la estadística multivariada es la simplificación de datos, sin la pérdida de información (Dryden & Mardia, 2016; Zelteman, 2015).

Algunos autores como Johnson & Wichem (2014) consideran bajos números muestrales a $n = 10$, mientras que Cardini *et al.* (2015) señalan que $n > 20$ debería considerarse lo mínimo, y $n > 10$ (por grupo) un mínimo absoluto (Corder & Foreman, 2014). Aunque todavía existen discrepancias al respecto, en general se considera a $n > 30$ como un tamaño de muestra adecuado para análisis estadísticos (Corder & Foreman, 2014; Sheskin, 2011); salvo por Zelditch *et al.* (2004), quienes mencionan que un tamaño apropiado es $n > 60$, ya que esto cumple con el criterio de distribución normal multivariada.

Regresión múltiple multivariada

La regresión es una técnica clásica dentro de la estadística, su objetivo básico es realizar inferencias sobre una variable continua de respuesta con base en una o más variables predictoras. Si sólo se emplea una única variable predictora en el modelo, se denomina regresión lineal simple. Si se utiliza más de una variable predictora para predecir una variable de respuesta, se conoce como regresión lineal múltiple (Denis, 2020; Manthey & Ousley, 2020).

Una función de regresión múltiple multivariada, en su forma más básica, utiliza x_1 , x_2 para predecir y_1 , y_2 , ambas continuas. Es una regresión múltiple porque contiene más de una variable explicativa, y se conceptualiza como una regresión múltiple multivariada porque tiene más de una variable de respuesta, permitiendo generalizar el modelo de regresión lineal simple a casos más complejos; por ejemplo, en morfometría se emplea para

hacer una regresión de la forma (o bien, variables de forma) a partir de múltiples variables independientes, como el tamaño, la edad, el sexo, entre otras (Denis, 2021; Drake & Klingenberg, 2008; Johnson & Wichem, 2014; Zelditch *et al.*, 2012).

Análisis de componentes principales (PCA)

Esta es una técnica de exploración básica dentro de las herramientas de análisis estadístico de la forma, que, en términos simples, maximiza la varianza dentro de la muestra y disminuye la dimensionalidad de los datos. Para esto, emplea una combinación lineal sobre las variables dependientes (como las coordenadas de Procrustes), rotando y agrupando los datos a lo largo de ejes ortogonales, denominados componentes principales (PCs). El resultado de estas operaciones permite reducir conjuntos complejos de datos a un espacio dimensional más pequeño, manteniendo la información significativa, pero expresada en unas nuevas y pocas variables (Dudzik, 2019; Piazzese *et al.*, 2017; Zelditch *et al.*, 2012).

Un PCA permite examinar los principales patrones de covariación en datos métricos, lo cual es útil dentro de la morfometría geométrica, ya que permite trabajar en un espacio multivariado, denominado morfoespacio. Los hallazgos de un PCA resultan en ejes o dimensiones que sirven para visualizar y evaluar la dirección de la variación biológica de la forma, dependiendo del número de variables en los datos y expresada por una ecuación lineal que usa las cargas de cada coordenada de *landmark*. Es común que los primeros dos ejes contengan la mayor cantidad de varianza dentro de la muestra, siendo el PC1 el que expresa la mayor proporción y generalmente se acerca a una explicación en relación con la alometría; para construir los componentes principales, el análisis utiliza la matriz de varianza-covarianza, que agrupa las asociaciones existentes entre las variables (Dudzik, 2019; Manthey & Ousley, 2020; Zelditch *et al.*, 2012).

El *software R* (R Core Team, 2023) contiene diferentes funciones para llevar a cabo un PCA, las dos más comunes son: 1) *prcomp()* y 2) *princomp()*. La primera función es la más convencional y recomendable, ya que computa los eigenvalores y eigenvectores a través de una técnica denominada descomposición de valores singulares, mientras que la segunda función aplica una descomposición de valores propios. La función *prcomp()* permite ejecutar el PCA sin la necesidad de estandarizar los datos previamente, es decir, es posible realizar el análisis sobre la matriz de varianza-covarianza, especificando el parámetro *scale = FALSE* (si se introduce *scale. = TRUE*, el PCA se ejecutará sobre la

matriz de correlación, estandarizando los datos a desviación estándar 1). La decisión de estandarizar los datos conlleva varios criterios, como considerar si las variables originales fueron recolectadas en las mismas unidades (si no es así, las varianzas podrían ser disparatadas y no conmensurables), sumado a esto, estandarizar los datos en ocasiones implica dificultades al momento de hacer inferencias estadísticas con los componentes. En este sentido, dentro de la morfometría geométrica es frecuente usar la matriz de varianza-covarianza, debido a que facilita el tratamiento de los componentes principales si se planea utilizarlos para otros cálculos, además, las variables de forma ya suelen hallarse en las mismas unidades antes de efectuar los análisis estadísticos —al escalarse las coordenadas de *landmarks* por procesos como el análisis generalizado de Procrustes— (Denis, 2020; Hewson, 2009).

Análisis de coordenadas principales (PCoA)

Es una técnica de ordinación y exploración con la cual se analizan los eigenvalores y eigenvectores de una matriz que contiene las distancias o similitudes entre todos los datos, dando resultados parecidos a un análisis de componentes principales. No obstante, a diferencia de un PCA, los eigenvectores representan las coordenadas en un morfoespacio y no proveen la carga para las variables individuales que se emplean en la visualización de una aproximación morfogeométrica común, es decir, se simplifica la construcción y descomposición de la matriz de varianza-covarianza de las variables de forma, como lo son las coordenadas homologadas de los vértices que se pueden obtener a través de modelos tridimensionales, manteniendo la interpretación estadística por medio del análisis de la varianza explicada en cada uno de los ejes de las coordenadas principales (Davis, 1986; Hammer, 2022, 2023; Pomidor *et al.*, 2016).

Análisis de conglomerados (CA)

Es una técnica heurística que captura la naturaleza estructural de los datos y los separa en grupos (clústeres) que son significativos y/o útiles; en biología, por ejemplo, el CA se ha utilizado para automatizar los procesos matemáticos taxonómicos y generar clasificaciones jerárquicas. Esto tiene varios propósitos, como la síntesis y comprensión de información contenida en un espacio o tiempo complejo, datos multivariados que con frecuencia se trabajan bajo técnicas como el PCA o la regresión. El CA permite aplicar un algoritmo a un

subconjunto de datos consistente sólo en prototipos de clúster (como matrices de distancias), y dependiendo del número de prototipos y la precisión con que estos representen a los datos originales, los resultados pueden compararse con aquellos que se hubieran obtenido por medio del uso de todo el conjunto completo (Borcard *et al.*, 2011; Tan *et al.*, 2014).

El CA agrupa los datos a partir de la información que describe a los objetos o individuos en la muestra, así como a las asociaciones presentes entre ellos. El objetivo es agrupar a todos los objetos o individuos que son similares o se relacionan entre sí y dividirlos de los que son diferentes o no están relacionados con objetos o individuos en otros grupos. Entre mayor sea la similitud dentro de un grupo y más grande su diferencia con otros, más distintivo será el agrupamiento. Además, esto permite saber si cierta pérdida de información puede ser aceptable y si es necesario llevar a cabo una reducción sustancial al tamaño de los datos (Borcard *et al.*, 2011; Tan *et al.*, 2014).

Hay dos tipos esenciales de agrupamiento: 1) jerárquicos y 2) no jerárquicos o particionales. Un conglomerado jerárquico es aquel en el que los miembros de los clústeres de rango inferior se vuelven miembros de clústeres más grandes y de mayor rango (en general, este tipo no genera agrupamientos superpuestos). Un conglomerado no jerárquico se caracteriza por producir una partición única y sencilla, sin ninguna jerarquía intergrupala. De los agrupamientos jerárquicos surgen dos principales clases de árboles: 1) árboles enraizados y 2) árboles no enraizados. En los primeros, todos los nodos de menor rango derivan de un nodo simple; en los segundos, no hay claridad en relación con el origen de los nodos (Kaur & Bawa, 2016; Tan *et al.*, 2014).

De acuerdo con estas categorías, también existen varios tipos de clústeres. Los clústeres bien separados son aquellos donde cada objeto o individuo está más cerca o es más similar a otro objeto en el clúster que a cualquier otro objeto que no está dentro del clúster. Un clúster basado en prototipos es aquel en el que cada objeto está más cerca del prototipo que define el agrupamiento, que del prototipo de cualquier otro clúster. Los dendogramas o clústeres basados en gráficos se dan cuando los datos están representados en un esquema, donde los nodos son los individuos u objetos y los enlaces muestran las conexiones entre ellos. Un clúster basado en densidad se presenta cuando existe una región densa de objetos que está rodeada por un área de baja densidad. Finalmente, los clústeres

que comparten una propiedad, como su nombre lo indica, engloban todas las definiciones previas (por lo cual también se conocen como clústeres conceptuales, ya que se le debe introducir al algoritmo el concepto que dividirá a los grupos), separando a un conjunto de datos bajo una característica compartida por todos (Tan *et al.*, 2014).

Un aspecto importante del CA es el tratamiento que se le da al tamaño del clúster; para esto existen dos enfoques: 1) no ponderado y 2) ponderado. El primero trata a todos los agrupamientos del mismo modo, lo cual se traduce en otorgarles diferentes pesos a los datos que conforman los distintos clústeres, mientras que, en el segundo, tener en cuenta el tamaño del clúster les da a los datos el mismo peso en diferentes clústeres (Borcard *et al.*, 2011; Hammer, 2022; Kaur & Bawa, 2016).

El método de agrupamiento por pares no ponderado usando promedios aritméticos (o UPGMA, por sus siglas en inglés) sirve para unir a un individuo u objeto a un grupo sobre la media de las distancias entre él y todos los miembros del grupo. Cuando dos grupos se anidan, lo hacen a la media de las distancias entre todos los miembros de un grupo y todos los miembros del otro (Hammer, 2022; Kaur & Bawa, 2016).

Con frecuencia esta técnica viene acompañada de otra conocida como *bootstrapping* o permutación, la cual es útil para cuantificar niveles o intervalos de confianza relacionados con el árbol o clúster general, así como sus ramas. Estos niveles de confianza se muestran en los nodos del dendograma en forma de porcentajes y facilitan la interpretación de la similitud que tienen los objetos o individuos en el clúster, además, permiten decidir a qué nivel cortar el dendograma (Borcard *et al.*, 2011; Hammer, 2022; Kaur & Bawa, 2016).

La escala de distancia en el clúster muestra la distancia entre los subclústeres sobre cada rama del árbol, el usuario u observador debe decidir el valor de corte que mejor se adapte a la aplicación que conlleva. Este valor de corte o nivel de similitud determina el número de grupos. Para determinarlo se debe tener en cuenta si la aplicación o propósito es general o específico; el modo más simple es cortar el dendograma en un punto dentro del amplio rango de los coeficientes de semejanza, en el cual el número de clústeres permanezca constante, debido a que ese rango amplio indica que los clústeres se hallan bien separados en el espacio de atributos. En pocas palabras, esta decisión es menos sensible al error cuando se corta el dendograma en el punto donde la amplitud del rango es más grande (Singh & Rajamani, 1996).

Para explicar el comportamiento inter e intragrupal en el clúster es necesario mencionar que, si el árbol o dendrograma se corta sobre un alto valor de similitud, se identificará un número grande de pequeños grupos, mientras que cortar sobre un nivel bajo de similitud resultará en unos cuantos grupos grandes (Singh & Rajamani, 1996).

Estadístico de Procrustes (PROTEST)

Esta técnica se desarrolló para la comparación de conjuntos de datos multivariados y permite identificar asociaciones de matrices en distintos tipos de estudios, así como calcular el grado de correlación o concordancia existente entre dichas matrices. Este análisis es una alternativa a la clásica prueba de Mantel, donde cada conjunto de datos primero se convierte a una matriz de distancias por pares que expresa la diferencia entre cada par de individuos dentro de un espacio multivariado —por ejemplo, un PCA— (Mantel & Valand, 1970; Peres-Neto & Jackson, 2001).

La prueba de Mantel entonces calcula la correlación entre las dos matrices de distancias, utilizando un procedimiento aleatorio para evaluar si la correlación es diferente de la aleatoria. Esta perspectiva tiene dos ventajas: 1) la posibilidad de emplear el gran número de distancias disponible, tanto de espacios euclidianos como no euclidianos, y 2) cualquier tipo de datos puede usarse para construir la asociación entre matrices. No obstante, siempre va a ser necesario transformar los datos a matrices de distancias, cuya representación espacial puede no ser la misma a la obtenida de los datos originales (Mantel & Valand, 1970; Peres-Neto & Jackson, 2001).

A diferencia de la prueba de Mantel, una opción más accesible es aplicar un enfoque basado en la superposición de Procrustes, utilizando las matrices de datos originales o sus soluciones ordinales, escalándolas y rotándolas para hallar el ajuste óptimo. De esta manera, la suma de residuales al cuadrado entre las configuraciones y su superposición puede emplearse para llevar a cabo asociaciones métricas, usando un procedimiento de permutación que sirve para evaluar la significancia estadística del análisis generalizado de Procrustes —o bien, examinar el patrón de consistencia en conjuntos de datos multivariados— (Jackson, 1995; Mardia *et al.*, 1979; Peres-Neto & Jackson, 2001).

Capítulo III. Metodología

A quien vendrá después. La forma en que podrá trasladarse a través del tiempo y las órbitas.

—H. P. Lovecraft, El caso de Charles Dexter Ward

Muestra

La muestra consistió en 348 tomografías computarizadas craneales de personas que asistieron al servicio de imagenología del Hospital General de México (HGM). Dichas tomografías están en resguardo en el Laboratorio de Antropología y Odontología Forense de Ciencia Forense-UNAM y fueron cedidas al laboratorio para análisis retrospectivo en el marco del proyecto Conacyt-PN-2016-2518 (FacMed FM/DI/124/2016) y DGAPA-PAPIIT No. IA401818.

Para proteger los datos personales, se anonimizaron los archivos de las tomografías computarizadas, asignándole un identificador (ID) a cada individuo en la muestra, identificador que estuvo conformado por un código de cuatro caracteres numéricos. Por otra parte, el proceso de selección de la muestra implicó, como principal criterio de inclusión, que los senos esfenoidales fueran claramente visibles en la tomografía computarizada, que el hueso esfenoides estuviera completo y no se encontrara afectado por procesos traumáticos o patológicos que impidieran la segmentación íntegra del fenotipo, y que todos los individuos provinieran de estados al interior de México (este dato se consultó en el archivo DICOM de cada tomografía). No se excluyó ningún individuo por edad o sexo, dado que se quería contar con el mayor número de personas para explorar la varianza total, evaluar el funcionamiento individualizante de los métodos e investigar la utilidad de sus propiedades bioantropológicas en contextos forenses.

De la muestra, 148 individuos son de sexo femenino y 200 son de sexo masculino. El rango de edad cubre desde los 7 hasta los 97 años, con una media de 46.72 años. También se midió el volumen de la pneumatización de los senos esfenoidales, siendo el valor mínimo 112.49 mm³ y el valor máximo 21688.54 mm³, con una media de 6742.97 mm³. Además, 290 personas cuentan con senos esfenoidales bilaterales y 58 poseen senos esfenoidales unilaterales. En la Figura 18 y Figura 19 se visualiza una serie de histogramas que exponen la distribución de los individuos; para realizar los gráficos, se

suprimió el individuo 0252, debido al registro incorrecto de su edad en los datos de la tomografía.

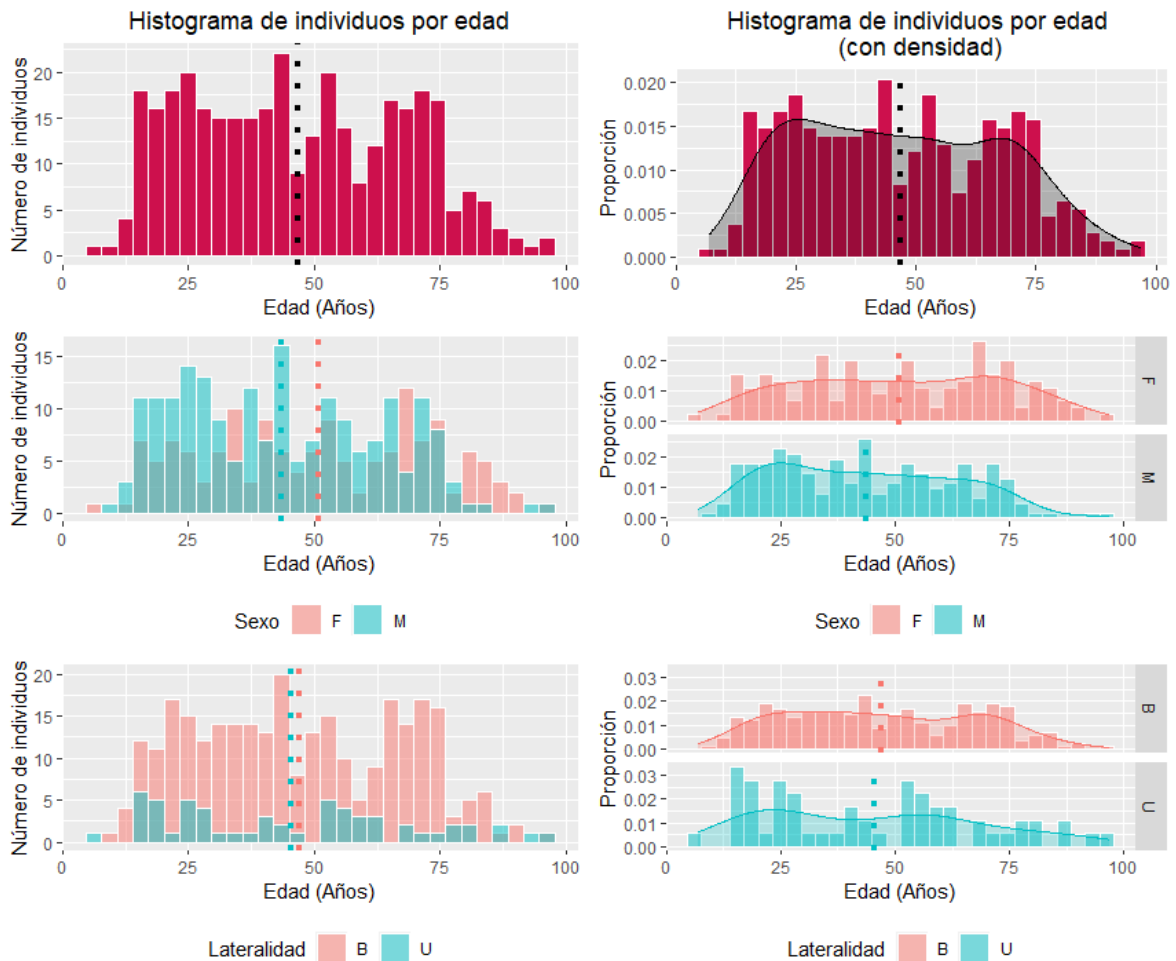


Figura 18. Distribución numérica de los individuos en la muestra. En la primera columna se exhiben los histogramas de distribución por edad, mientras la segunda columna expone las curvas de densidad de dicha distribución (en forma de proporciones). La primera fila presenta los histogramas generales de los individuos, mientras la segunda y la tercera fila lo hacen en relación con el sexo (donde *F*: femenino y *M*: masculino) y la lateralidad de los senos esfenoidales (donde *B*: bilaterales y *U*: unilaterales), respectivamente. La media grupal en todos los histogramas se visualiza como una línea punteada.

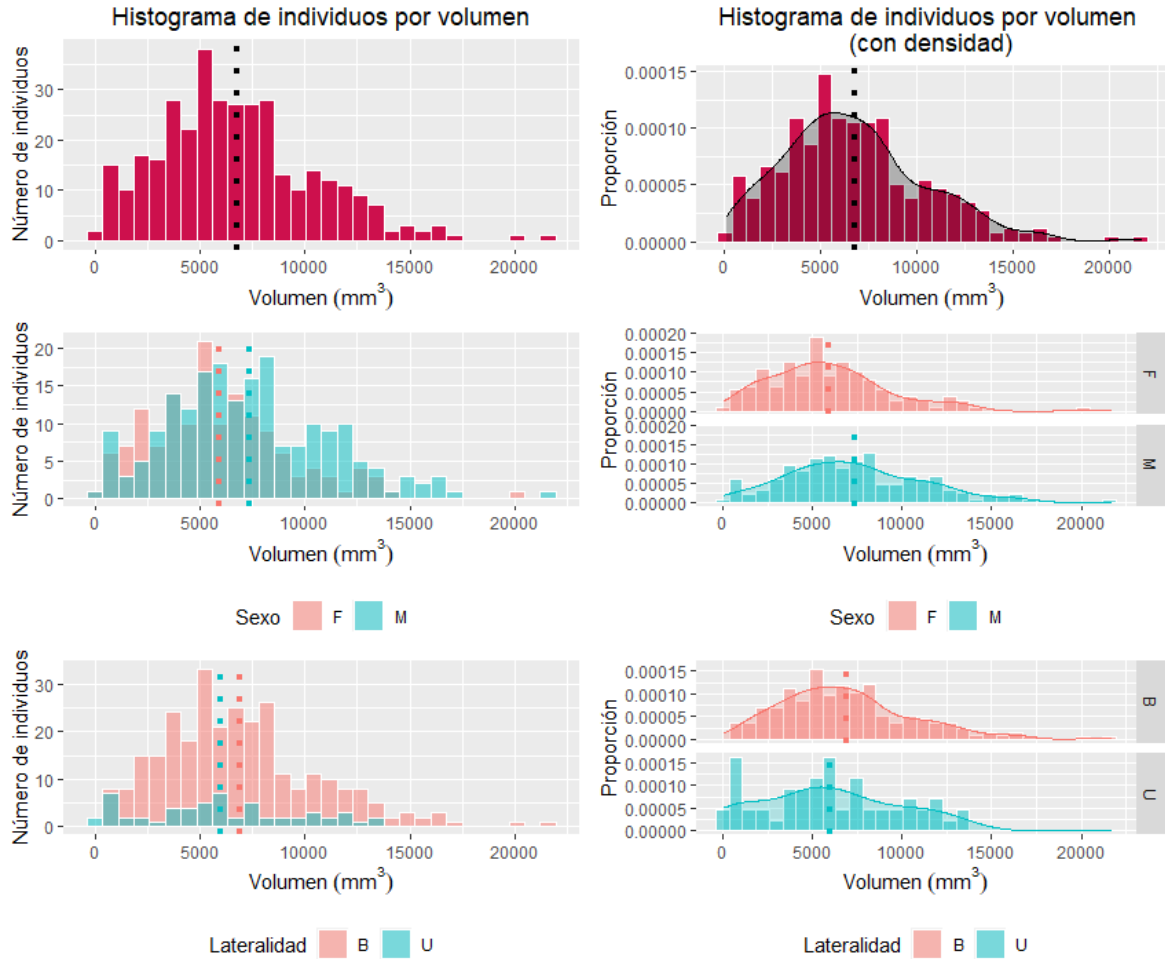


Figura 19. Distribución numérica de los individuos en la muestra. En la primera columna se exhiben los histogramas de distribución por volumen, mientras la segunda columna expone las curvas de densidad de dicha distribución (en forma de proporciones). La primera fila presenta los histogramas generales de los individuos, mientras la segunda y la tercera fila lo hacen en relación con el sexo (donde *F*: femenino y *M*: masculino) y la lateralidad de los senos esfenoidales (donde *B*: bilaterales y *U*: unilaterales), respectivamente. La media grupal en todos los histogramas se visualiza como una línea punteada.

Diseño del estudio

Las tomografías computarizadas se descargaron desde el servicio de nube *Google Drive* hasta el equipo de cómputo, donde posteriormente se importaron al *software 3D Slicer*, donde se realizó la segmentación y renderizado de los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales. Con los modelos 3D se aplicaron dos técnicas por morfometría geométrica: 1) *Automated Landmarking through Point cloud Alignment and Correspondence Analysis* (ALPACA) y 2) *Generalized Procrustes Surface Analysis* (GPSA). Para ambas técnicas se seleccionó un modelo de referencia (0073), con base en la segmentación realizada a partir de la tomografía computarizada, la cual fue evaluada con la

mejor resolución, definición y nitidez en cuanto a la anatomía de los senos esfenoidales. Al final, los análisis estadísticos se desarrollaron en dos *softwares*: 1) *RStudio*, donde se llevaron a cabo PCAs y análisis por regresión, y 2) *Past*, donde se realizaron los CAs. La Figura 20 resume la metodología de investigación.

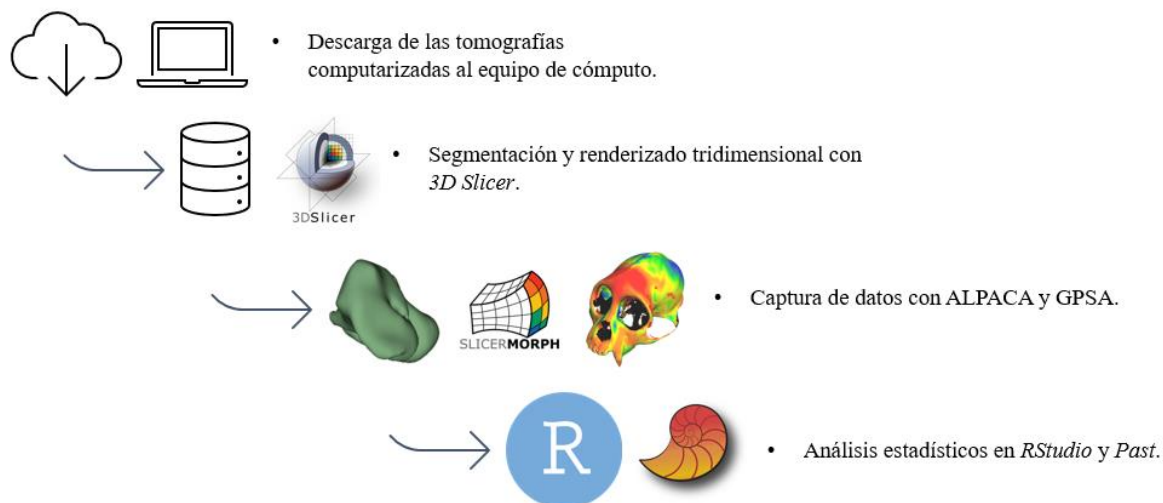


Figura 20. Metodología de investigación.

Segmentación y renderizado tridimensional de los senos esfenoidales

Los archivos DICOM de las tomografías computarizadas se importaron en el *software 3D Slicer* versión 4.13.0. Los senos esfenoidales se segmentaron manualmente, siguiendo las recomendaciones reportadas en la literatura (Robles, Carew, *et al.*, 2020; Robles, Morgan, *et al.*, 2020). Se realizó una búsqueda sistemática de las unidades Hounsfield óptimas para la segmentación de los senos paranasales; al ser cavidades de aire, se empleó un *threshold* promedio entre -1024 y -300. Durante la segmentación se aplicó un algoritmo de suavizado de superficie, estandarizando el valor predeterminado en 0.5 para todos los modelos.

Los modelos segmentados se exportaron en formato STL y se estandarizó el sistema de coordenadas en LPS (*left-posterior-superior*), recomendado por el propio programa. Posteriormente, los archivos STL se convirtieron a formato PLY desde *3D Slicer* para llevar a cabo los análisis subsecuentes (Fedorov *et al.*, 2012).

Protocolo automático de digitalización de *landmarks* por *high-density morphometrics* (Automated Landmarking through Point cloud Alignment and Correspondence Analysis o ALPACA)

Para este proceso se empleó la extensión *SlicerMorph* dentro del *software 3D Slicer* (Rolfe, Pieper, *et al.*, 2021). Se seleccionó el modelo 0073 como el *mesh* de referencia (al provenir de la tomografía con mejor resolución, definición y nitidez en las estructuras). Este modelo se importó a *3D Slicer* en el módulo *PseudoLMGenerator*, ajustando el parámetro *Spacing tolerance* en 5.00 para submuestrear el número de puntos que caracterizaran la morfología tridimensional del modelo base. Se estimó un número de 334 puntos, mismos que se proyectaron sobre la superficie del modelo para generar una plantilla. Las coordenadas de los puntos se exportaron en formato *.FCSV.

Posteriormente, empleando el módulo ALPACA de *SlicerMorph*, se proyectó automáticamente la misma cantidad de *pseudolandmarks* en la muestra de modelos de senos esfenoidales, seleccionando el *mesh* base y sus *pseudolandmarks*. Las coordenadas de *pseudolandmarks* correspondientes a cada modelo se exportaron en archivos independientes. Estos archivos se trataron en el *software RStudio* para convergerlos en una matriz de coordenadas cartesianas en forma $K \times M$, siendo K los *pseudolandmarks* (filas) y M las dimensiones (columnas). Esta configuración permite ordenar los *pseudolandmarks* como un vector, donde las coordenadas se listan a lo largo de una fila simple. En una matriz de configuración cada fila se asocia a un individuo y cada columna indica las coordenadas tridimensionales x, y, z de los *pseudolandmarks* (Zelditch *et al.*, 2012).

Con esta matriz se llevó a cabo una curva de evaluación de muestreo de *landmarks* (LaSEC) bajo 100 iteraciones, con el propósito de determinar si el número de *pseudolandmarks* empleado era óptimo para caracterizar la morfología tridimensional de los senos esfenoidales. El análisis (Figura 21) mostró que el número de *pseudolandmarks* óptimo era 129, con un nivel de ajuste de 0.99 (Watanabe, 2018).

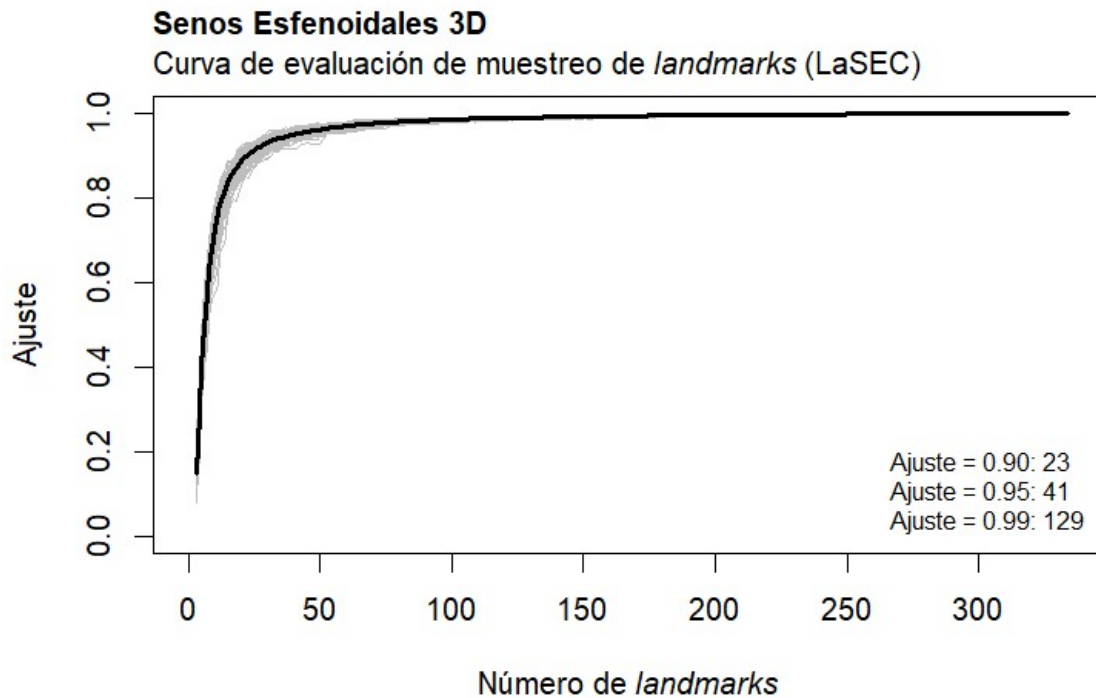


Figura 21. Curva de evaluación de muestreo de *landmarks* (LaSEC) para los senos esfenoidales 3D por el método ALPACA. En la esquina inferior derecha se especifica el nivel de ajuste y el número de *landmarks* óptimo asociado.

Se volvió a realizar la plantilla de *pseudolandmarks* en *3D Slicer*, con el modelo de referencia 0073 y ajustando el parámetro *Spacing tolerance* a 7.99, para obtener el número de puntos óptimo, con base en los resultados de la curva LaSEC. En este caso, se emplearon 130 *pseudolandmarks*, para asegurar el ajuste en la caracterización de la forma de los senos esfenoidales.

Análisis generalizado de Procrustes (GPA)

Los archivos independientes en formato *.FCSV con las coordenadas de los *pseudolandmarks* se importaron en *3D Slicer* y en el módulo *GPA* de *SlicerMorph* se llevó a cabo el GPA para suprimir los efectos por escala, rotación y traslación, dejando sólo la información de forma. La matriz con las coordenadas de Procrustes o variables de forma se importó en el software *RStudio* para realizar un análisis de componentes principales (PCA) y exportar los *PCscores*.

Análisis generalizado de Procrustes de superficie (*Generalized Procrustes Surface Analysis* o GPSA)

Para aplicar la técnica, se volvió a seleccionar el modelo 0073 como el prototipo, este se introdujo en el *software* GPSA junto con la muestra de modelos y se seleccionó la opción homónima del programa. Posterior a esto, se eligió la opción *Ordination* para realizar un análisis de coordenadas principales (PCoA) y poder visualizar el patrón de cambio biológico de la forma tridimensional de los senos esfenoideales, sobre los primeros tres ejes o dimensiones de variación, así como de sus extremos negativos y positivos.

Análisis de componentes principales (PCA)

Tanto para las variables de forma obtenidas a través de ALPACA como para las coordenadas homologadas de los vértices de los modelos mediante GPSA se aplicó un análisis exploratorio por PCA en el *software RStudio*, con el propósito de realizar la descripción de los cambios de forma asociados a los primeros tres componentes principales en sus extremos negativos y positivos. No se estandarizaron las variables en ninguno de los dos casos, dada la inexistencia de diferencias unitarias en ellas. La selección de los componentes principales a describir obedece a lo dicho por Strauss (2010), quien explica que, al ser un análisis de reducción de dimensiones, el morfoespacio de individuos en los primeros dos o tres componentes del PCA puede caracterizar la mayor cantidad de variación en los datos.

Análisis de conglomerados (CA)

Posteriormente, se llevó a cabo un CA en el *software Past* bajo 10,000 permutaciones, empleando los *PC scores* exportados del PCA y considerando los componentes principales que acumulaban el 95% de la variación para generar el gráfico con el método UPGMA y la distancia euclidiana como medida de similitud (Lenardi & Merwin, 2010). La decisión de utilizar un conjunto de 10,000 permutaciones radica en la necesidad de estimar un intervalo de confianza para el agrupamiento entre los individuos del clúster. De acuerdo con esta premisa, Zelditch *et al.* (2004, 2012) reportan que, si el tiempo de cómputo no es un problema, se pueden realizar pruebas de permutación entre 1,000 y 2,000 conjuntos para estimar un intervalo de confianza del 95% como parámetro estadístico. Sin embargo, junto

con Roy *et al.* (2010), también sugieren que es más apropiado aplicar un rango de 10,000 a 20,000 permutaciones para estimar un intervalo de confianza a 0.001. Por otro lado, para la selección de los componentes principales, Zelditch *et al.* (2012) mencionan que una regla básica es interpretar sólo aquellos componentes que representan más del 5% de la variación, ya que después de ello cada PC pierde varianza de manera progresiva.

El nivel de corte de los dendogramas se determinó por examinación visual y considerando un criterio de alto valor de similitud o mínima distancia, con el objetivo de identificar el número de grupos o pareos correctos, incorrectos y mimetismos obtenidos en cada clúster (Borcard *et al.*, 2011; Singh & Rajamani, 1996).

Regresión múltiple multivariada

Con las coordenadas homologadas exportadas del método GPSA, que fue el método más preciso para la individualización, se llevó a cabo una regresión múltiple multivariada con la forma para evaluar la correlación y las diferencias de variación por edad, lateralidad, sexo, tamaño y volumen. Las variables de lateralidad y sexo se dicotomizaron para realizar el análisis.

Estadístico de Procrustes (PROTEST)

Se seleccionaron los primeros cuatro componentes principales de ambos métodos (ALPACA y GPSA), los cuales concentraban la misma cantidad de variación, aproximadamente, con el propósito de determinar si existía proporcionalidad entre los dos conjuntos de análisis.

Diseño experimental

Inicialmente, se segmentaron las 348 tomografías computarizadas de los individuos mexicanos, renderizando los modelos 3D de los senos esfenoidales. Con esta muestra se desarrolló un PCA y un CA sin réplicas por el método ALPACA, y un PCA y un CA sin réplicas por el método GPSA. En ambos métodos el modelo de referencia seleccionado fue el individuo 0073 (Figura 22).

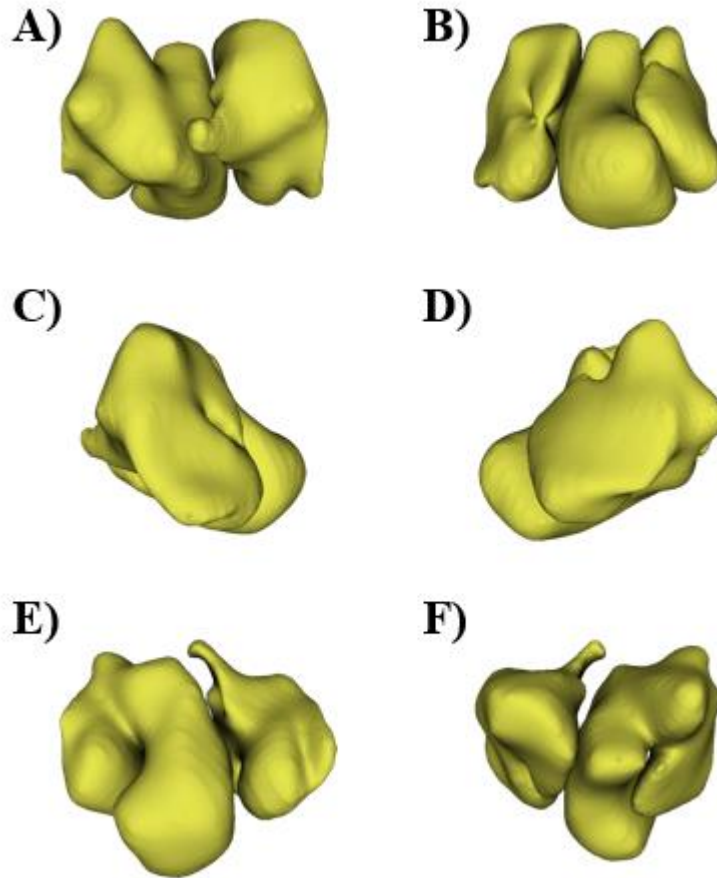


Figura 22. Modelo tridimensional de los senos esfenoidales del individuo 0073, empleado como modelo de referencia. Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

Para analizar la repetibilidad y evaluar el potencial de individualización de los métodos ALPACA y GPSA, se sumó un individuo más (del cual se conocían dos tomografías computarizadas que fueron adquiridas en tiempos distintos) y se volvieron a segmentar los senos esfenoidales de 31 individuos de la muestra, finalizando con una muestra de 380 individuos (349 individuos más 31 iteraciones). Se dejó pasar una temporalidad de dos semanas entre la primera y la segunda iteración. Esta muestra de 380 individuos se utilizó para realizar un PCA y un CA por el método ALPACA, así como un PCA y un CA por el método GPSA. Contabilizando las agrupaciones correctas, incorrectas y mimetismos de los CA, se calculó un porcentaje de precisión del 6.45% para el método ALPACA y un 74.19% para el método GPSA. Debido a los resultados positivos obtenidos por el método GPSA, se decidió emplear este método para los análisis posteriores.

El *software gpsa* permite realizar una variante del PCA, denominada análisis de coordenadas principales (PCoA). Con este análisis se reportó la variación morfológica de la

forma media para la muestra sin iteraciones ($n = 348$) y la muestra con iteraciones ($n = 380$).

Para examinar cualquier cambio en los resultados del PCA y el CA por el método GPSA, se resolvió realizar los mismos análisis sin iteraciones ($n = 348$) y con iteraciones ($n = 380$), pero empleando otro individuo como modelo de referencia. En este caso, se optó por elegir los senos esfenoidales del individuo 0308 (Figura 23), ya que representaron la forma tridimensional más cercana a la media (obtenida del primer PCA sin réplicas por el método GPSA).

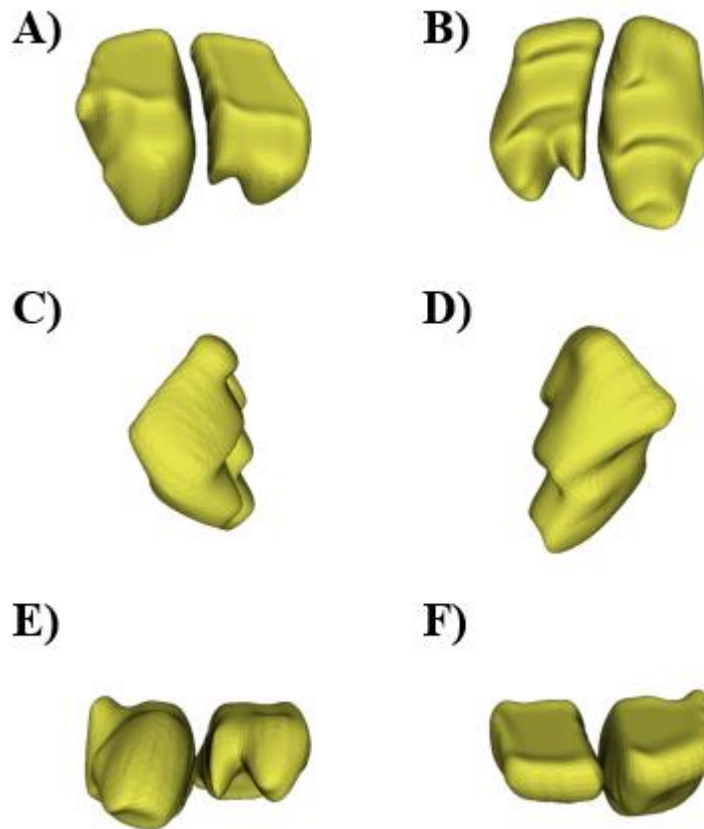


Figura 23. Modelo tridimensional de los senos esfenoidales del individuo 0308, empleado como modelo de referencia. Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

Posteriormente, se dividió la muestra sin iteraciones ($n = 348$) en dos conjuntos de datos: una anidación para senos esfenoidales bilaterales ($n = 290$) y una anidación para senos esfenoidales unilaterales ($n = 58$). Se desarrolló un PCA y un CA por el método GPSA para cada anidación.

Los últimos PCA sin iteraciones ($n = 348$), por el método GPSA, sirvieron para enfocarse en la exploración específica de grupos por sexo (categorías: femenino y

masculino), lateralidad (categorías: bilateral y unilateral), y población (cada categoría perteneciente a un estado de México), con el propósito de estudiar su varianza y evaluar posibles diferencias entre grupos. También se llevó a cabo una exploración de grupos por edad (categorías: adultos y juveniles), sin embargo, se tuvo que suprimir de la muestra a un individuo, ya que presentó un dato erróneo sobre su edad. Este análisis de grupos por edad fue el único donde se empleó una muestra de $n = 347$.

Para analizar con mayor detalle las relaciones entre la forma tridimensional de los senos esfenoidales, representada por las coordenadas homologadas de los vértices capturadas por GPSA de la muestra sin iteraciones ($n = 348$), y las variables edad, lateralidad, sexo, tamaño y volumen, se realizó una regresión múltiple multivariada, con la cual también se examinaron a profundidad las posibles diferencias estadísticamente significativas, además de obtener los índices de correlación de Pearson. Para estos análisis, tanto la variable de lateralidad como el sexo se dicotomizaron.

Finalmente, con el interés de determinar la proporcionalidad entre los conjuntos de datos (variables de forma) obtenidos por los métodos ALPACA y GPSA sin iteraciones ($n = 348$), se analizaron —a través de un estadístico de Procrustes— las matrices correspondientes a los PC *scores* de los primeros cuatro componentes de ambos métodos, los cuales acumularon una cantidad de varianza similar en sus respectivos PCA.

Capítulo IV. Resultados

El hecho de suponer que dos cosas son indiscernibles, significa la suposición de la misma cosa bajo dos nombres distintos.

—G. W. Leibniz, Cuarta carta (Tim Maudlin, Filosofía de la física I. El espacio y el tiempo)

ALPACA

Análisis de componentes principales (PCA)

Sin repeticiones

Se empleó la muestra de 348 individuos ($n = 348$), importando las coordenadas de Procrustes al *software RStudio* y realizando un PCA general de los datos, computando la matriz de varianza-covarianza con la función *prcomp()*, y los parámetros $scale. = F$ y $center = T$. La varianza total calculada en la muestra fue 0.08192312 y el porcentaje de varianza acumulada en los primeros tres componentes principales sumó un 33.656%. Por otro lado, el 95.02% de la varianza se concentró hasta el componente 97, y 172 PCs acumularon menos del 1% de varianza (0.983%).

La Figura 24 grafica en forma de un mapa de calor la variación de los *landmarks* individuales proyectados en la muestra, donde, de manera generalizada, la región que presenta la mayor variación morfológica es la inferolateral derecha (representada por las elipses tendientes al color rojo). Por otro lado, la región con menor variación se observa justo en el extremo contrario, siendo la superolateral izquierda (representada por las elipses de color azul rey).

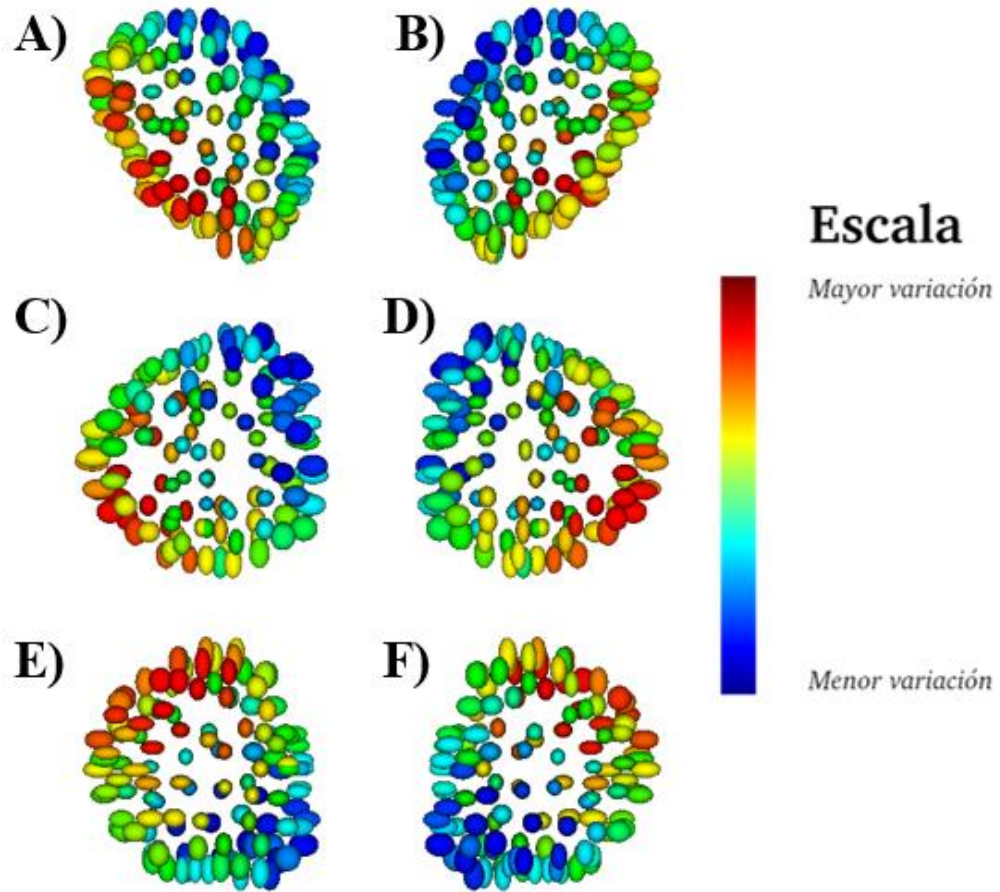


Figura 24. Mapa de calor de la variación general de los *landmarks* (representados como elipses) en la forma media de la muestra de senos esfenoidales sin repeticiones, a través del método ALPACA. La escala de colores va de tonos cálidos (rojo, naranja, amarillo) a tonos fríos (verde, cian, azul rey), donde el rojo indica la mayor variación y el azul rey la menor variación. Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

La Figura 25, Figura 26 y Figura 27 muestran la distribución de los individuos en el morfoespacio correspondiente, la elipse fue graficada con un intervalo de confianza del 95%.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

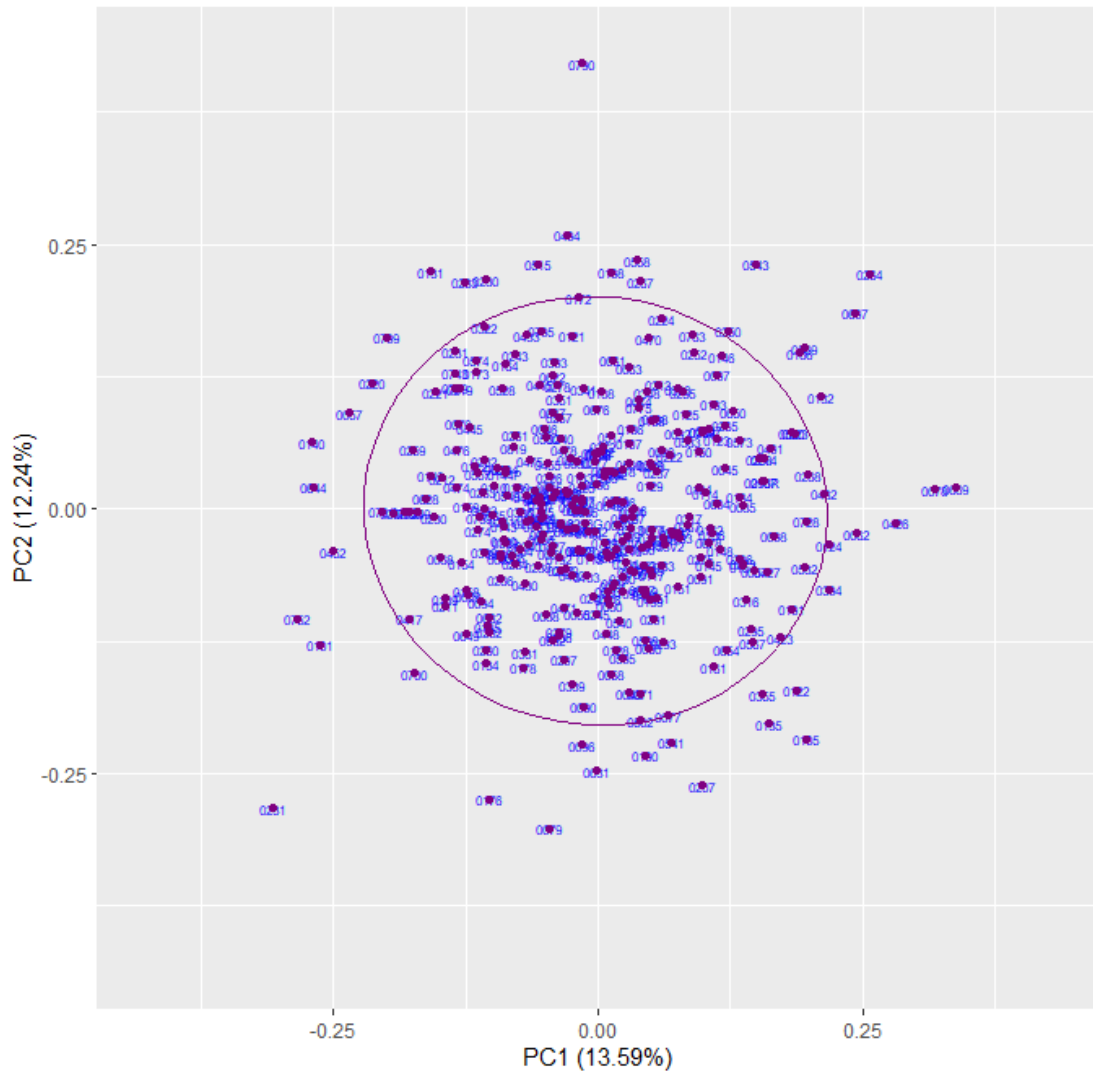


Figura 25. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC2) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método ALPACA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

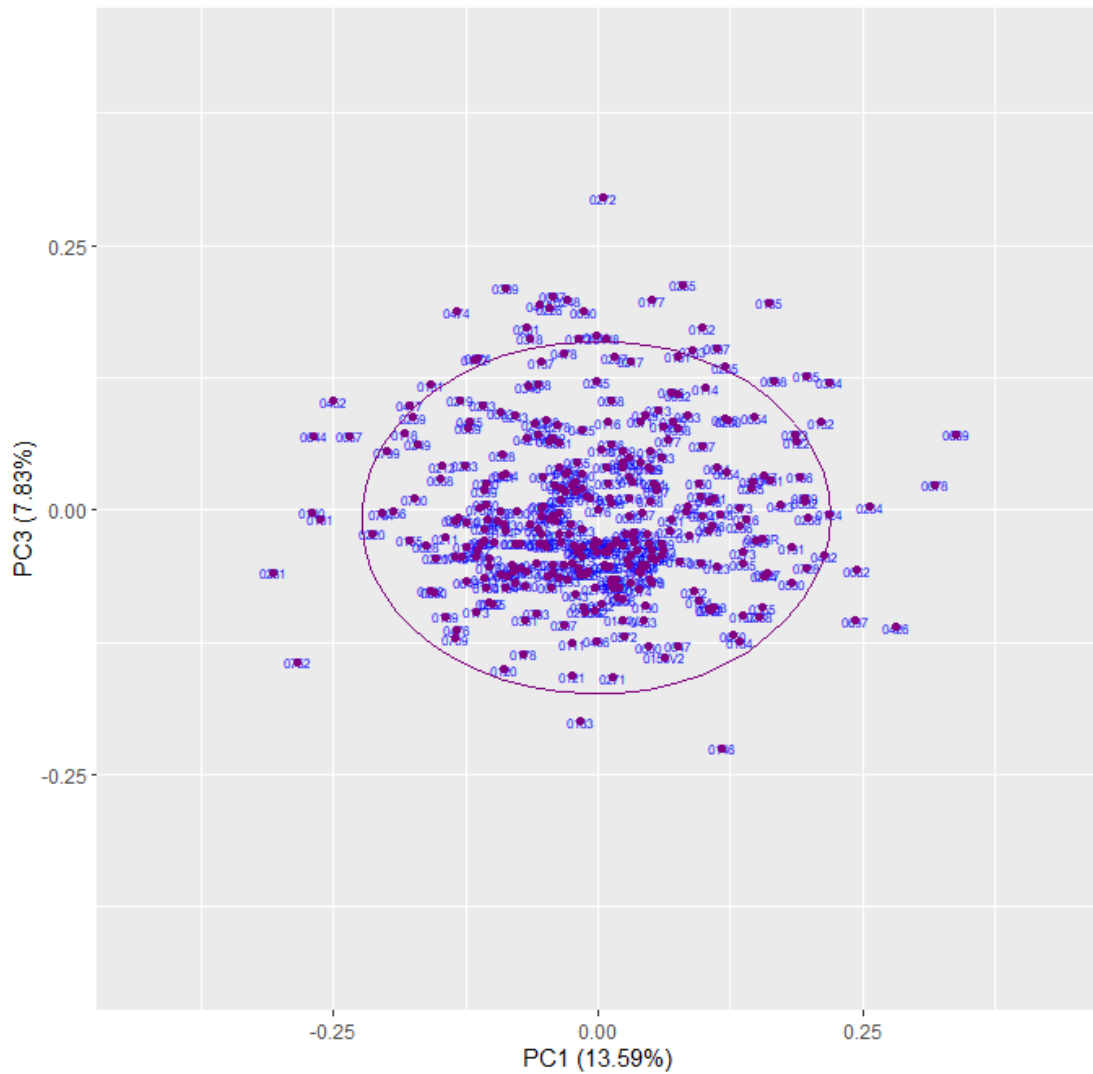


Figura 26. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC3) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método ALPACA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

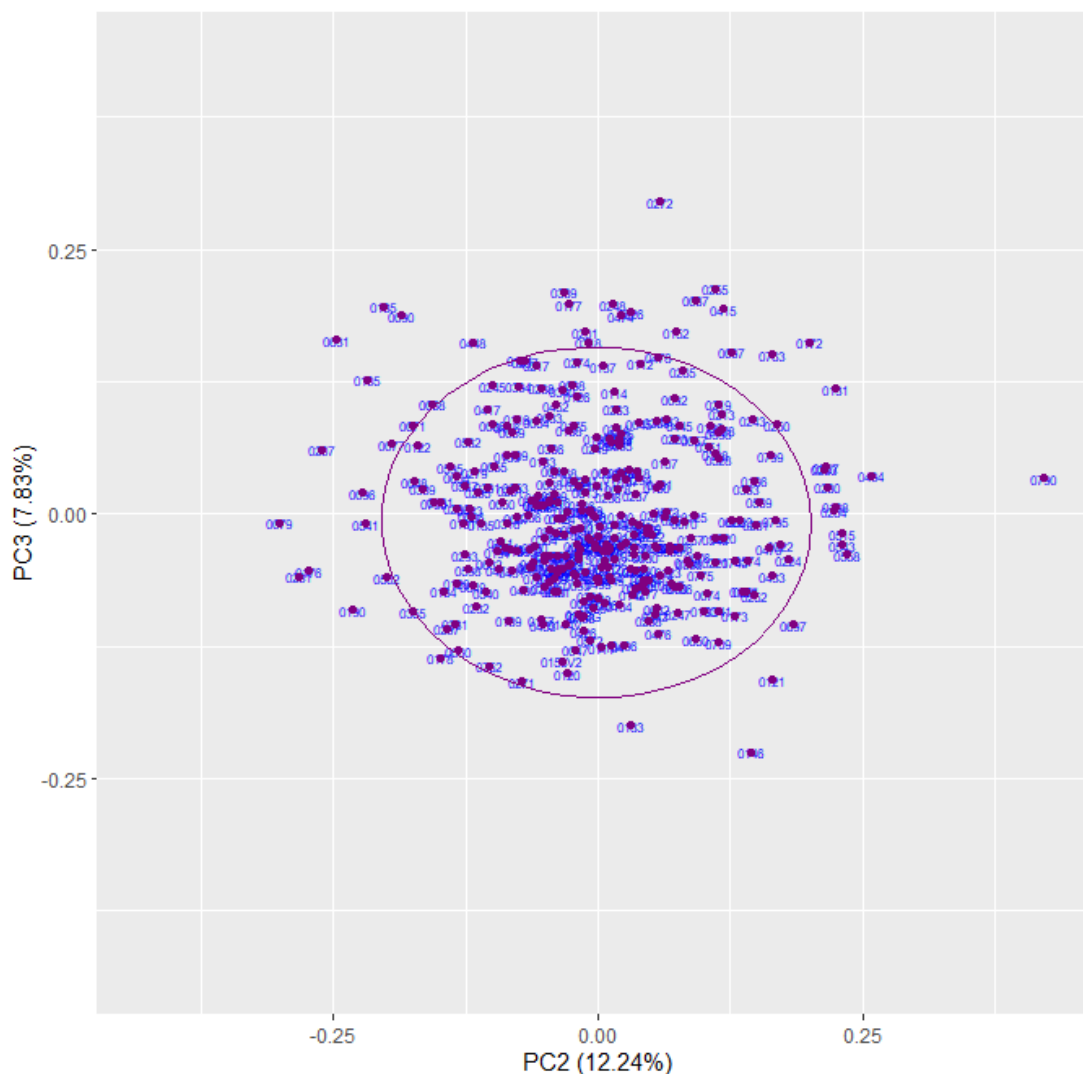


Figura 27. Gráfico del morfoespacio (PC2 y PC3) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método ALPACA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

En el PC1, los extremos de los ejes negativo y positivo están delimitados por los cambios morfológicos de los individuos 0231 y 0669, respectivamente; en el PC2, estos cambios están descritos por el individuo 0079 (en el extremo negativo) y 0790 (en el extremo positivo). Finalmente, en el PC3, la variación se desplaza en el extremo negativo hacia el individuo 0146 y en el extremo positivo hacia el individuo 0272.

En la Figura 28, se muestra la variación morfológica en el PC1, caracterizada en su eje negativo por unos senos unilaterales aplanados anteroposteriormente y alargados sobre

un plano inferosuperior. El eje positivo, por el contrario, se caracteriza por ser unos senos esfenoidales bilaterales expandidos hacia los laterales y con una mayor extensión neumática en su dimensión anteroposterior, a diferencia del extremo negativo.

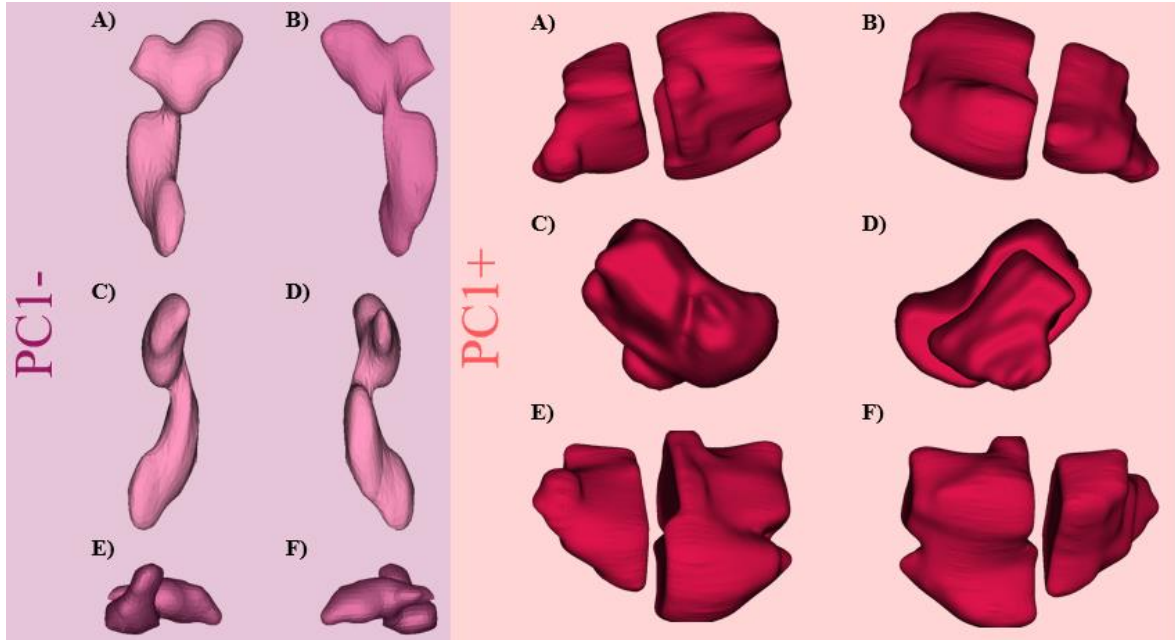


Figura 28. Extremos del PC1- (izquierda) y PC1+ (derecha) representados por los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales de los individuos 0231 (rosa) y 0669 (rojo). Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

En la Figura 29, se describen los cambios morfológicos del PC2, en el eje negativo se observan unos senos esfenoidales bilaterales, cuyos hemisenos izquierdo y derecho se hallan cercanos entre sí (a diferencia del eje positivo, cuyos hemisenos están más separados), así mismo, la pneumatización de los senos se extiende hacia ambos laterales de modo más homogéneo, mientras que, en el eje positivo, el hemiseno derecho se extiende hacia un plano superior y el hemiseno izquierdo hacia un plano inferior. Además, los senos esfenoidales del PC2+ poseen una menor profundidad en sentido posteroanterior que los senos esfenoidales del PC2-.

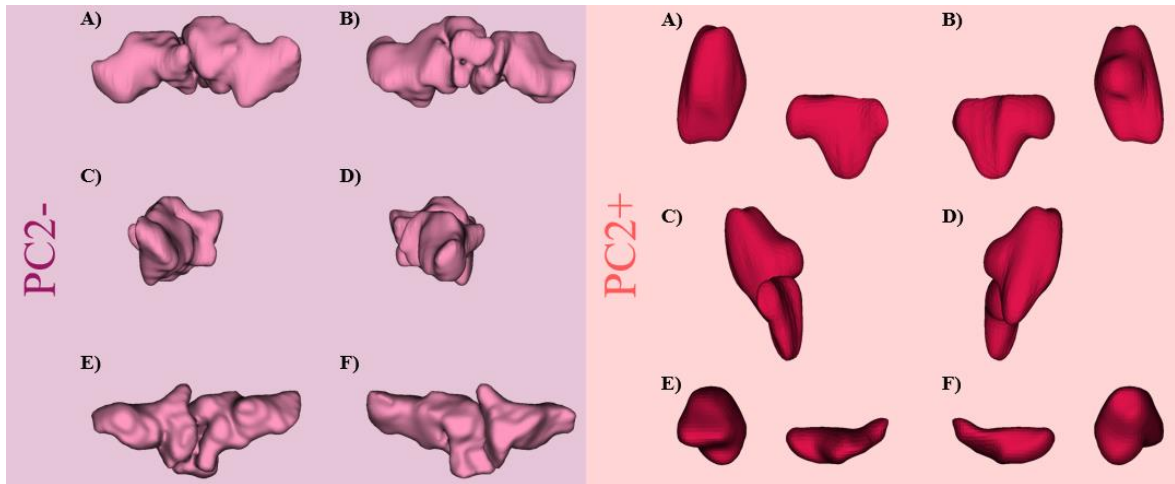


Figura 29. Extremos del PC2- (izquierda) y PC2+ (derecha) representados por los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales de los individuos 0079 (rosa) y 0790 (rojo). Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

En la Figura 30 se visualiza la variación morfológica del PC3, en el extremo negativo se encuentran unos senos esfenoidales bilaterales con hemisenos mayormente separados, pero unidos por una pequeña porción de pneumatización en la región inferior. El hemiseno derecho es más pequeño que el izquierdo y se encuentra expandido en sentido laterolateral, a diferencia del izquierdo, que se extiende sobre su eje inferosuperior. El extremo positivo del PC3 de igual manera muestra unos senos esfenoidales bilaterales, pero más cercanos entre sí que los del PC3-, además, la pneumatización del hemiseno izquierdo se extiende sobre su eje laterolateral y se expande hasta cubrir parte de la región superior del hemiseno derecho. Otra diferencia general entre ambos extremos indica que el volumen de aire en dirección posteroanterior disminuye en el PC3-, mientras que aumenta en el PC3+.

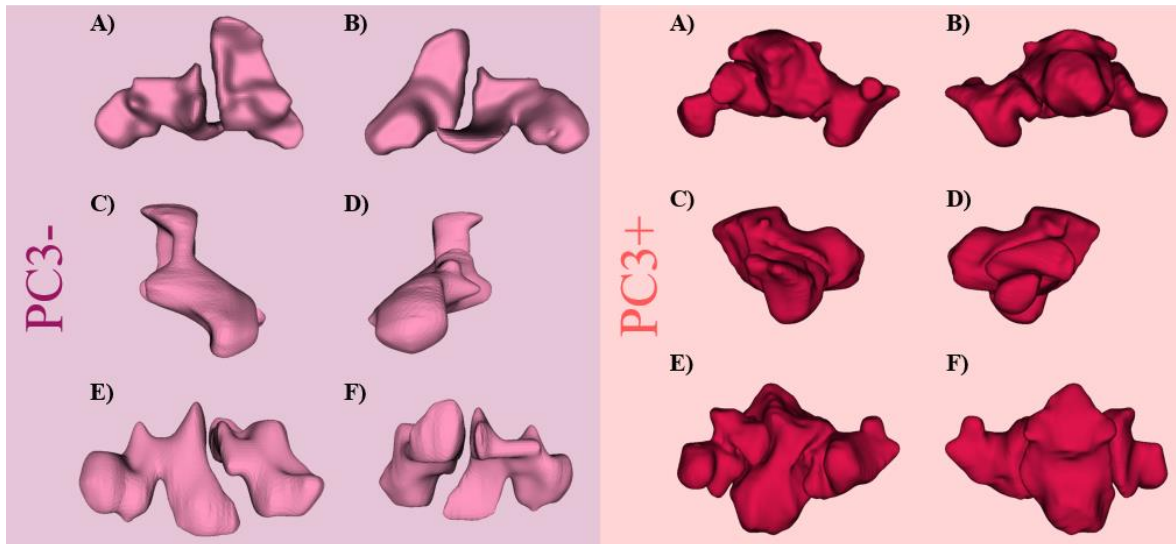


Figura 30. Extremos del PC3- (izquierda) y PC3+ (derecha) representados por los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales de los individuos 0146 (rosa) y 0272 (rojo). Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

Con repeticiones

Posterior al análisis sin repeticiones, se llevó a cabo un PCA empleando 349 individuos más 31 réplicas ($n = 380$) para evaluar la precisión de los pareos entre réplicas en un análisis de agrupación. Este PCA sumó una varianza total de 0.08043368, el 33.185% acumulado en los primeros tres componentes principales y el 95.02% retenido hasta el PC100, con 198 componentes principales sumando menos del 0.984% de la varianza (< 1%).

La Figura 31 mantiene el mismo patrón de variación de los *landmarks* que la Figura 24, centralizando la mayor variación en la región inferolateral derecha y la menor variación en la región superolateral izquierda.

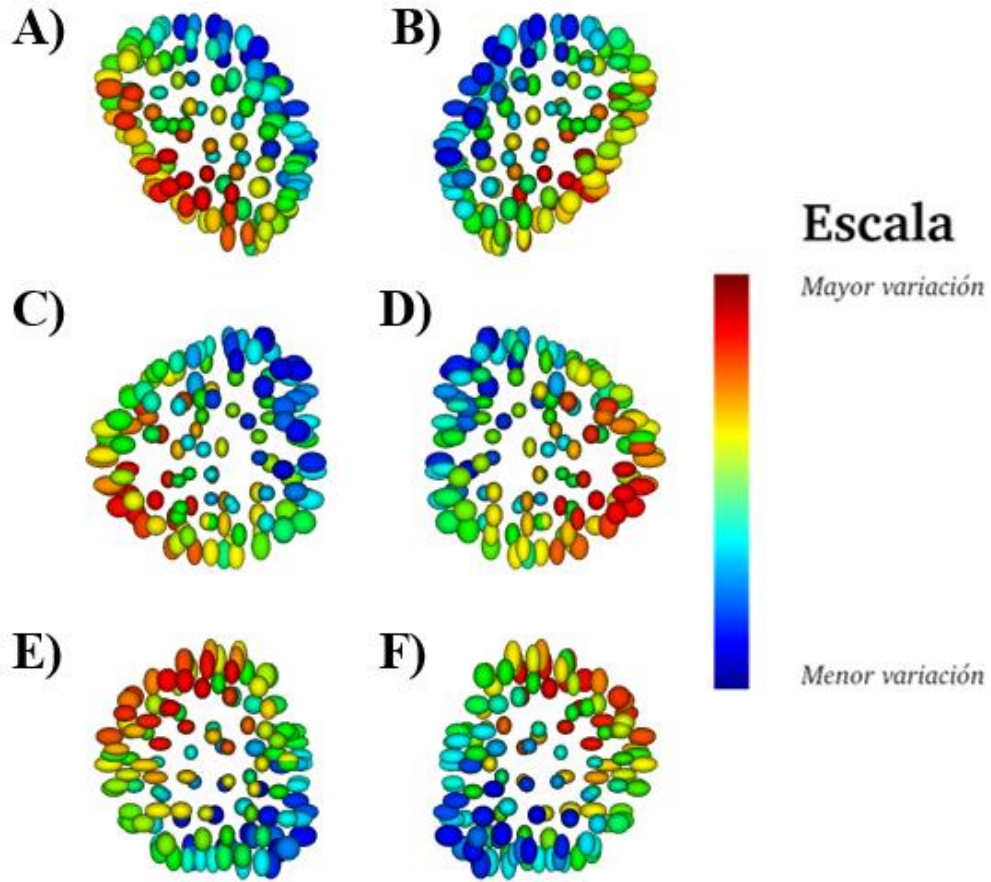


Figura 31. Mapa de calor de la variación general de los *landmarks* (representados como elipses) en la forma media de la muestra de senos esfenoidales con repeticiones, a través del método ALPACA. La escala de colores va de tonos cálidos (rojo, naranja, amarillo) a tonos fríos (verde, cian, azul rey), donde el rojo indica la mayor variación y el azul rey la menor variación. Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

En la Figura 32, Figura 33 y Figura 34 se visualiza el morfoespacio de los individuos a lo largo de los primeros tres componentes principales, con base en una elipse con un intervalo de confianza del 95%.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

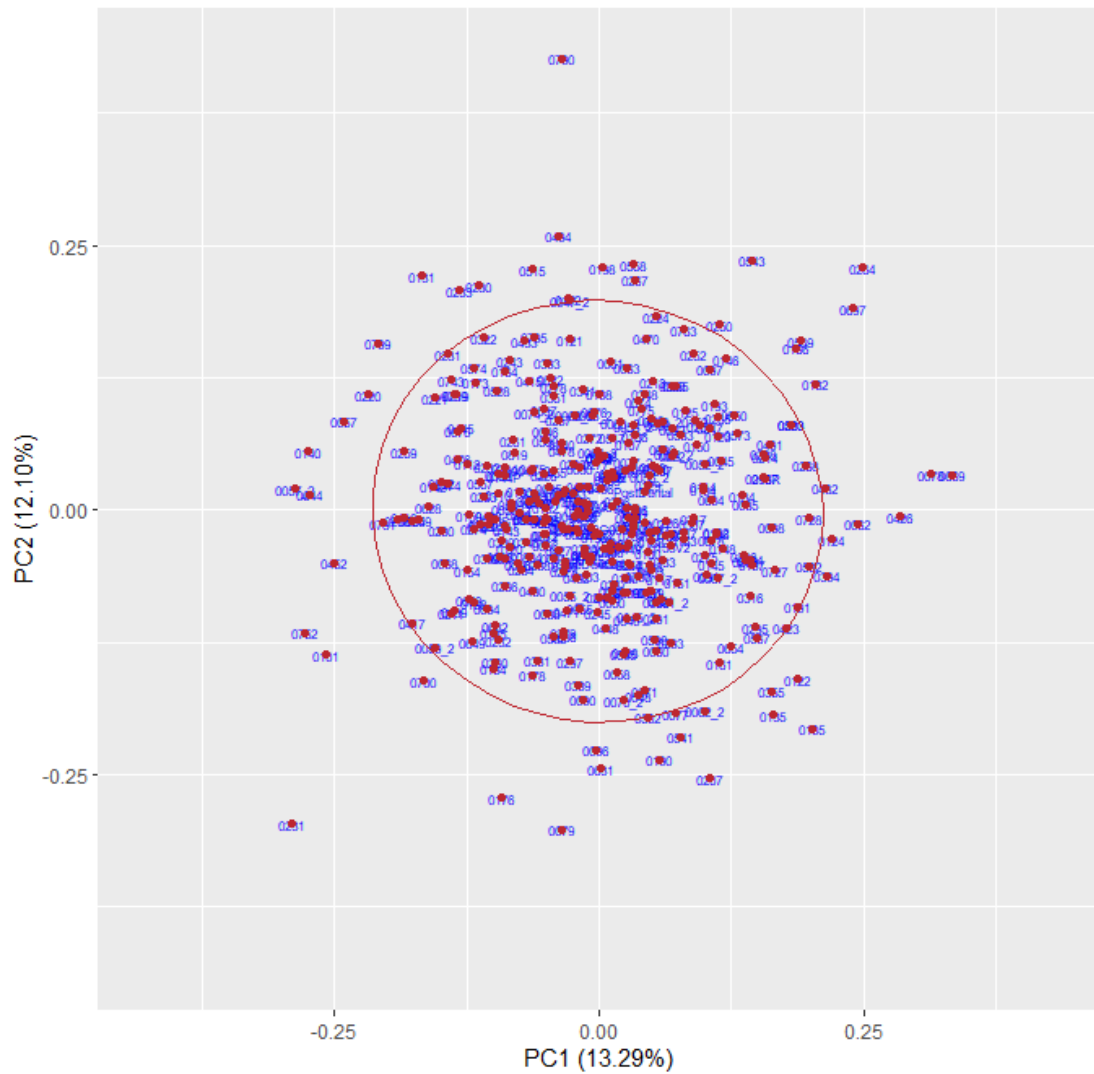


Figura 32. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC2) de los individuos (con repeticiones) obtenido del PCA por el método ALPACA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

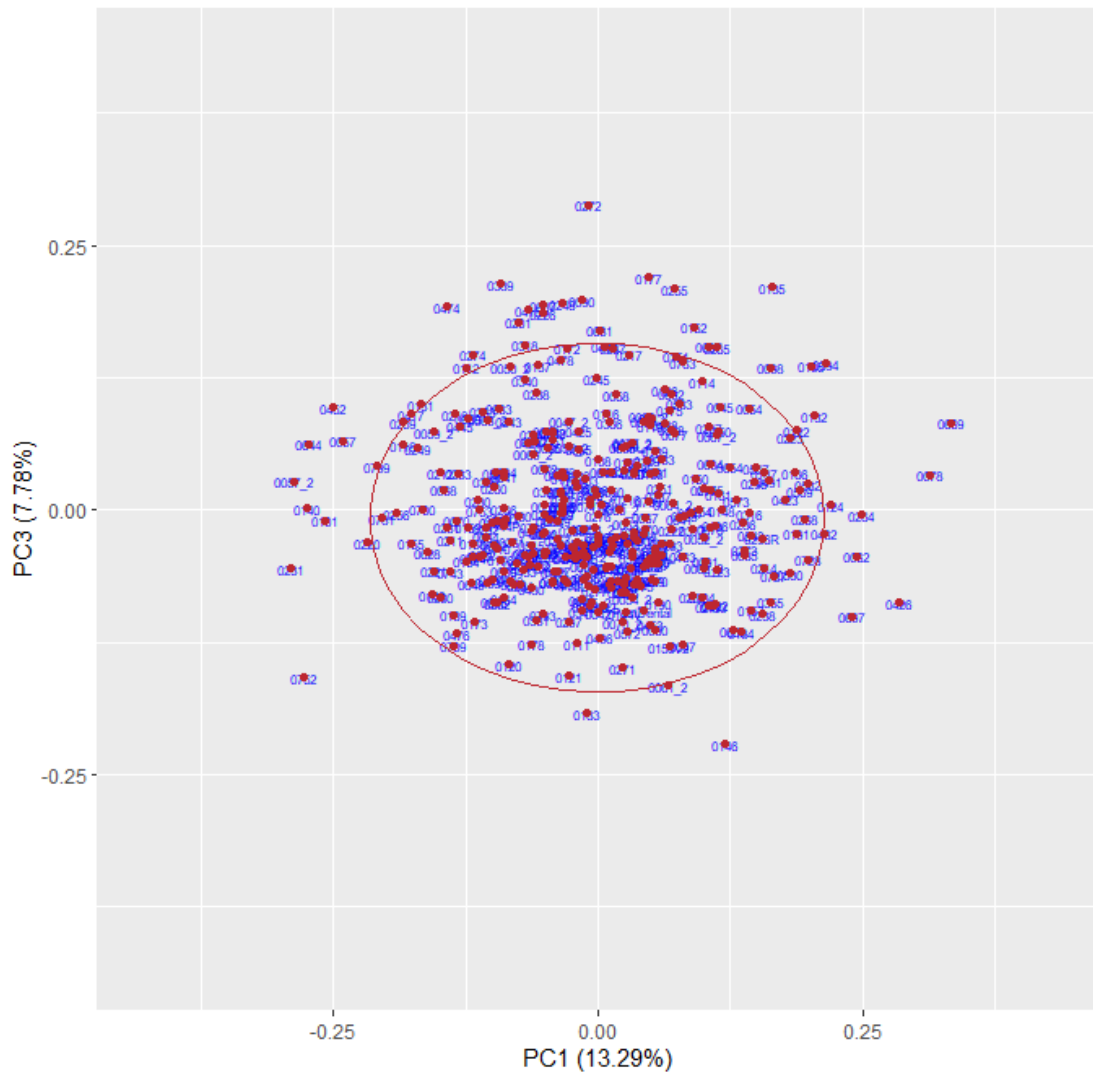


Figura 33. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC3) de los individuos (con repeticiones) obtenido del PCA por el método ALPACA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

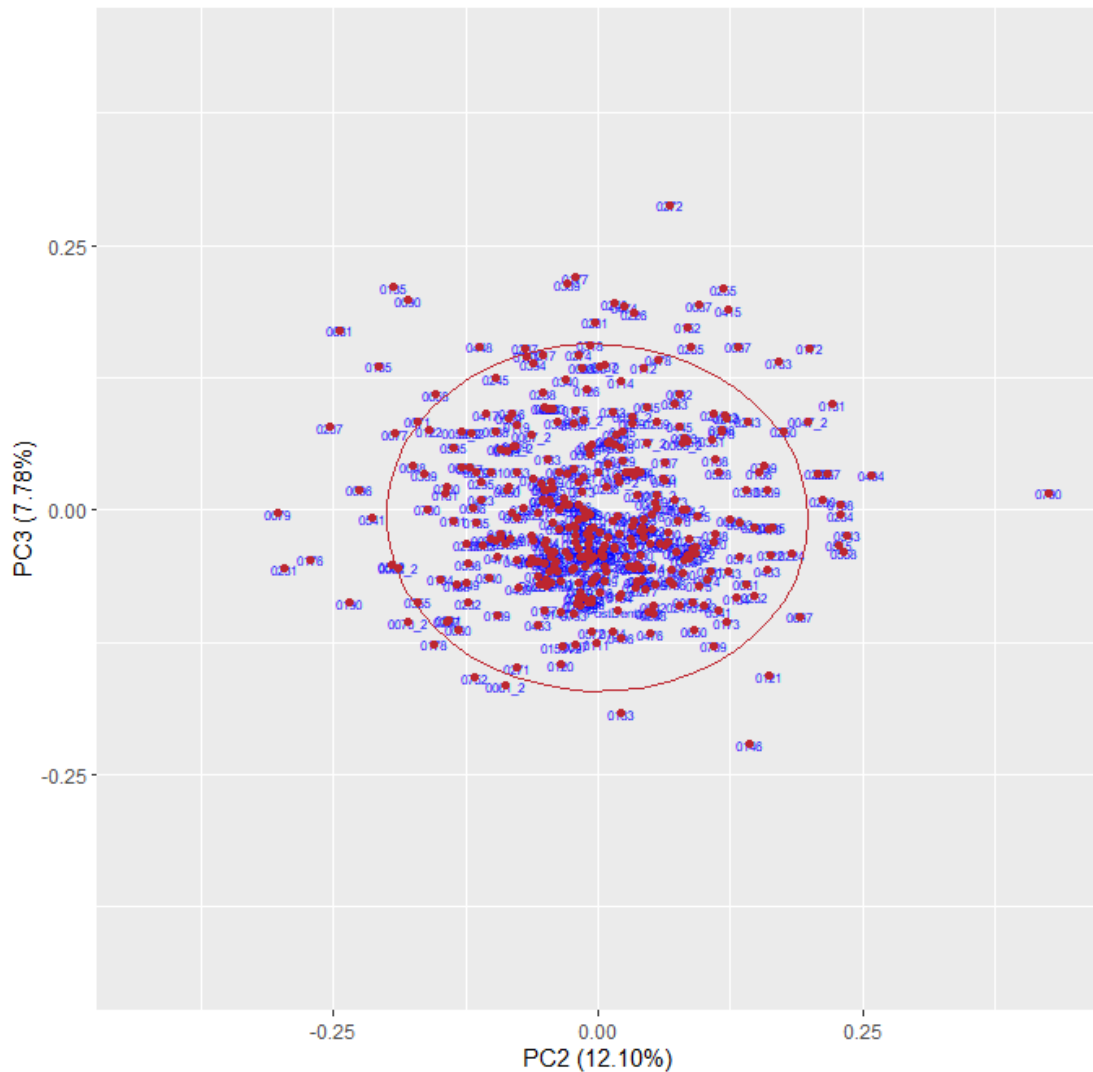


Figura 34. Gráfico del morfoespacio (PC2 y PC3) de los individuos (con repeticiones) obtenido del PCA por el método ALPACA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

La variación morfológica a lo largo de los primeros tres componentes principales está explicada por los mismos individuos descritos en el apartado del análisis de componentes principales sin repeticiones.

Análisis de conglomerados (CA)

Sin repeticiones

Con los componentes principales que concentraron el 95.02% de la varianza (PC1 al PC97) se realizó un CA para determinar la capacidad de individualización del método ALPACA. Para este análisis se empleó el algoritmo UPGMA y el índice de similitud euclidiano, computado bajo 10,000 permutaciones para estimar un intervalo de confianza del 95%, como se explicó en la metodología. La Figura 35 muestra el resultado gráfico del clúster (en **Anexos** se encuentra un desglose de todos los clústeres para una visualización óptima). En el gráfico se trazó una línea sobre el valor mínimo de distancia en 0.075, para llevar a cabo el conteo de agrupaciones correctas, incorrectas y mimetismos. En este caso, el CA mostró un patrón de unicidad del 100%, ya que no se identificaron agrupaciones por debajo del valor de corte mínimo establecido.

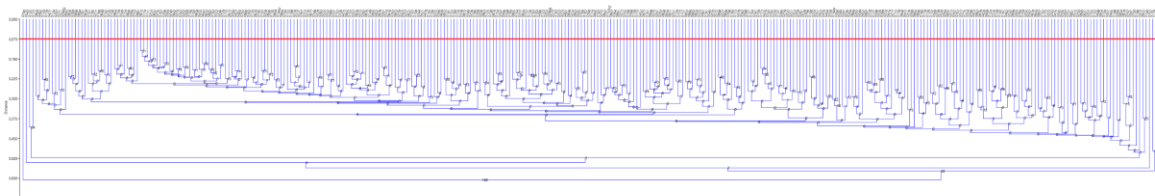


Figura 35. Clúster de los individuos sin repeticiones por el método ALPACA, la línea roja se trazó en el valor de corte mínimo de distancia a 0.075. Los identificadores en la parte superior del gráfico representan a las personas, mientras los agrupamientos entre ellas están simbolizados por las líneas azules, en orden jerárquico.

Para cada emparejamiento se observa un número que indica el porcentaje de similitud entre individuos, a partir de la forma tridimensional de los senos esfenoidales.

Con repeticiones

El CA con réplicas se realizó con los componentes 1 al 100, que concentraban el 95.02% de la varianza. La línea se trazó al mismo nivel que en el CA sin repeticiones (0.075) y se contabilizaron las clasificaciones correctas, incorrectas y mimetismos que se encontraban por debajo del valor de corte. En general, sólo dos individuos se clasificaron correctamente, obteniendo una precisión del 6.45% para el método ALPACA. Uno de estos individuos fue el 0073, quien coincidió con su par por debajo del valor mínimo de distancia y con un porcentaje de agrupación del 100%; este individuo fue el que sirvió como modelo de referencia para la proyección de los *pseudolandmarks* en la muestra.

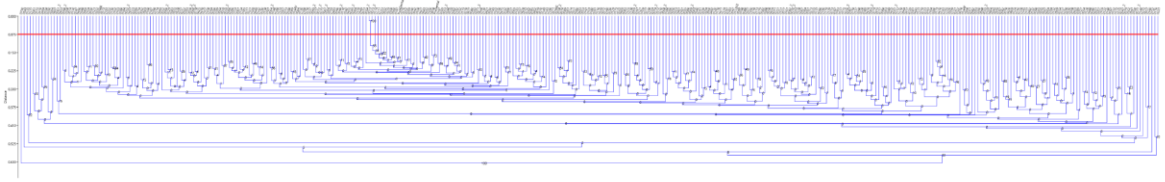


Figura 36. Clúster de los individuos con repeticiones por el método ALPACA, la línea roja se trazó en el valor de corte mínimo de distancia a 0.075. Los identificadores en la parte superior del gráfico representan a las personas, mientras los agrupamientos entre ellas están simbolizados por las líneas azules, en orden jerárquico. Para cada emparejamiento se observa un número que indica el porcentaje de similitud entre individuos, a partir de la forma tridimensional de los senos esfenoidales.

GPSA

Análisis de coordenadas principales (PCoA)

Sin repeticiones

La variación morfológica de la forma media se visualiza en la Figura 37. Estos mapas de calor se obtuvieron a partir de un PCoA realizado de manera directa en el *software gpsa* con la muestra de individuos sin repeticiones ($n = 348$). La región medial representa una gran variación (al observarse los tonos rojos más intensos) y, en un sentido más específico, la mayor parte de ésta destaca en dos puntos principales: la región superior y posterior. Por el contrario, la menor variación se encuentra alrededor de los extremos laterales de la forma media (obsérvese los tonos azul rey).

Desglosando el análisis, la primera coordenada (PCo1) mantiene la mayor variación en las regiones superior y posterior, mientras la menor variación se aloja completamente en ambos extremos laterales.

La PCo2 muestra que las regiones con mayor variación se hallan en la región posteroinferior, tanto en la región medial como en los laterales izquierdo y derecho; ligeramente hay otra zona de variación en la región superior.

La PCo3 representa la mayor variación en la región superior, principalmente en la región medial y ambos laterales; también se distinguen fluctuaciones en los extremos laterales izquierdo y derecho de la región inferior, no obstante, se hallan en menor medida.

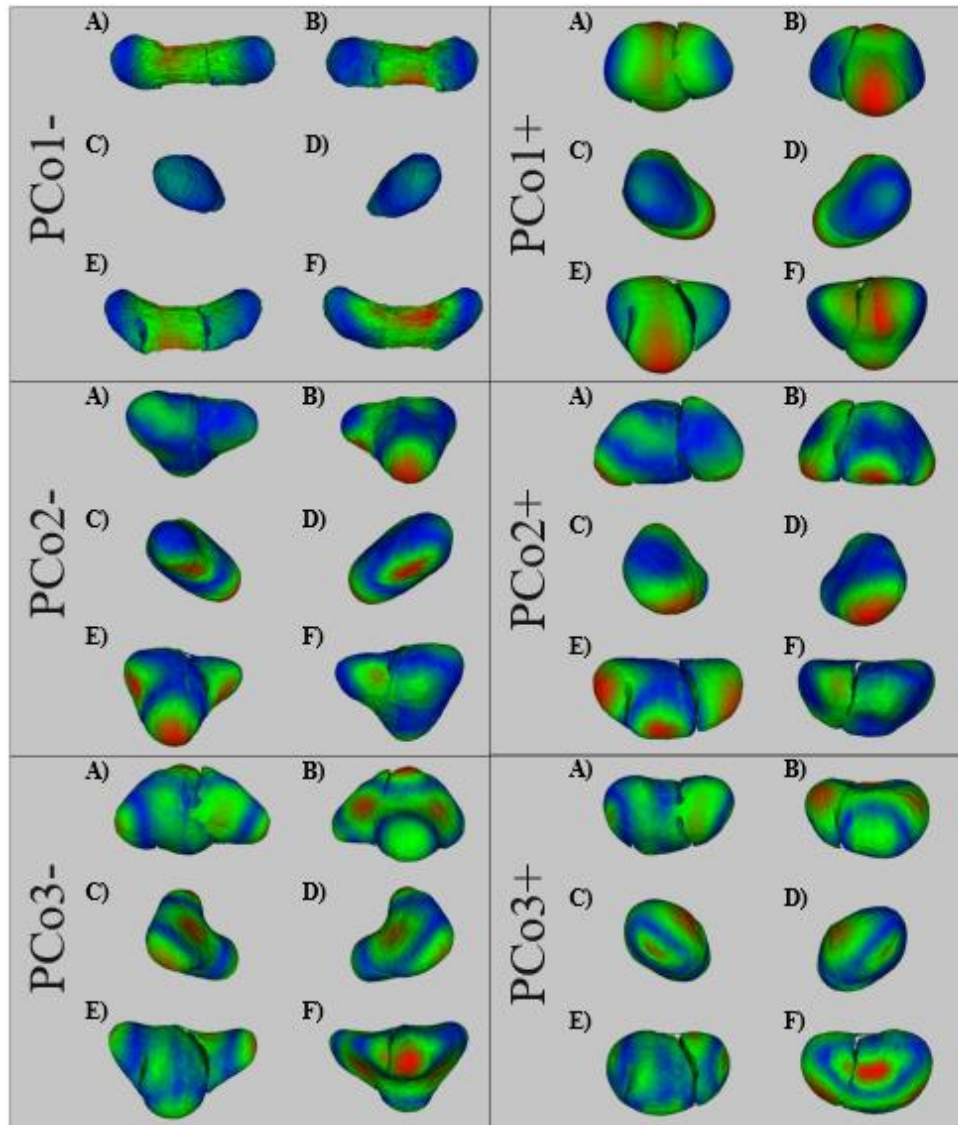


Figura 37. Mapa de calor de las primeras tres coordenadas principales que representan la variación general de la forma media de la muestra de senos esfenoidales sin repeticiones, por medio del método GPSA. Los colores cálidos (rojo) indican mayor variación, mientras los colores fríos (azul) representan menor variación. Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

Con repeticiones

La variación morfológica de la forma media para la muestra de individuos con réplicas ($n = 380$) se visualiza en la Figura 38. El patrón no varía en relación con los mapas de calor de las PCo1 y PCo2 vistos en el análisis sin repeticiones; sin embargo, en la PCo3 existe un pequeño cambio, ya que a la variación presente en la región superior se suma una zona en la región posterior y otra más ligera en la zona media de la región inferior; además, la variación observada en los extremos inferolaterales se ve reducida.

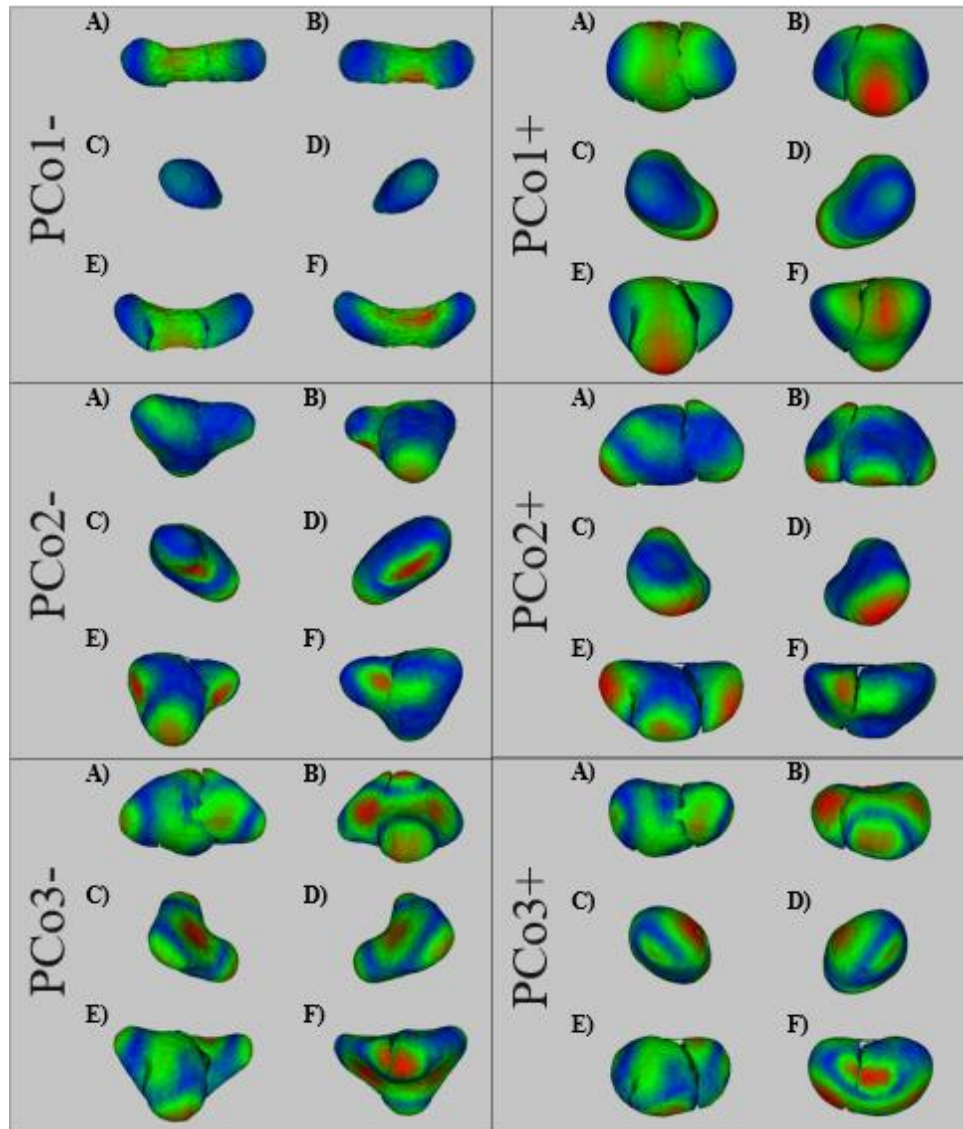


Figura 38. Mapa de calor de las primeras tres coordenadas principales que representan la variación general de la forma media de la muestra de senos esfenoidales con repeticiones, por medio del método GPSA. Los colores cálidos (rojo) indican mayor variación, mientras los colores fríos (azul) representan menor variación. Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

Análisis de componentes principales (PCA)

Sin repeticiones

Las coordenadas homologadas de los individuos ($n = 348$) obtenidas a través del *software gpsa* se importaron a *RStudio* para llevar a cabo un PCA con los datos. La varianza total computada resultó en 206.848, el porcentaje de varianza concentrada en los primeros tres PCs fue 22.374%, mientras que 25 componentes principales acumularon menos del 1% de varianza (0.969%) y con el 95.06% de la varianza reunida desde el PC1 hasta el PC255.

En la Figura 39, Figura 40 y Figura 41 se visualiza la distribución de los individuos en cada morfoespacio del PCA, empleando una elipse de confianza al 95%.

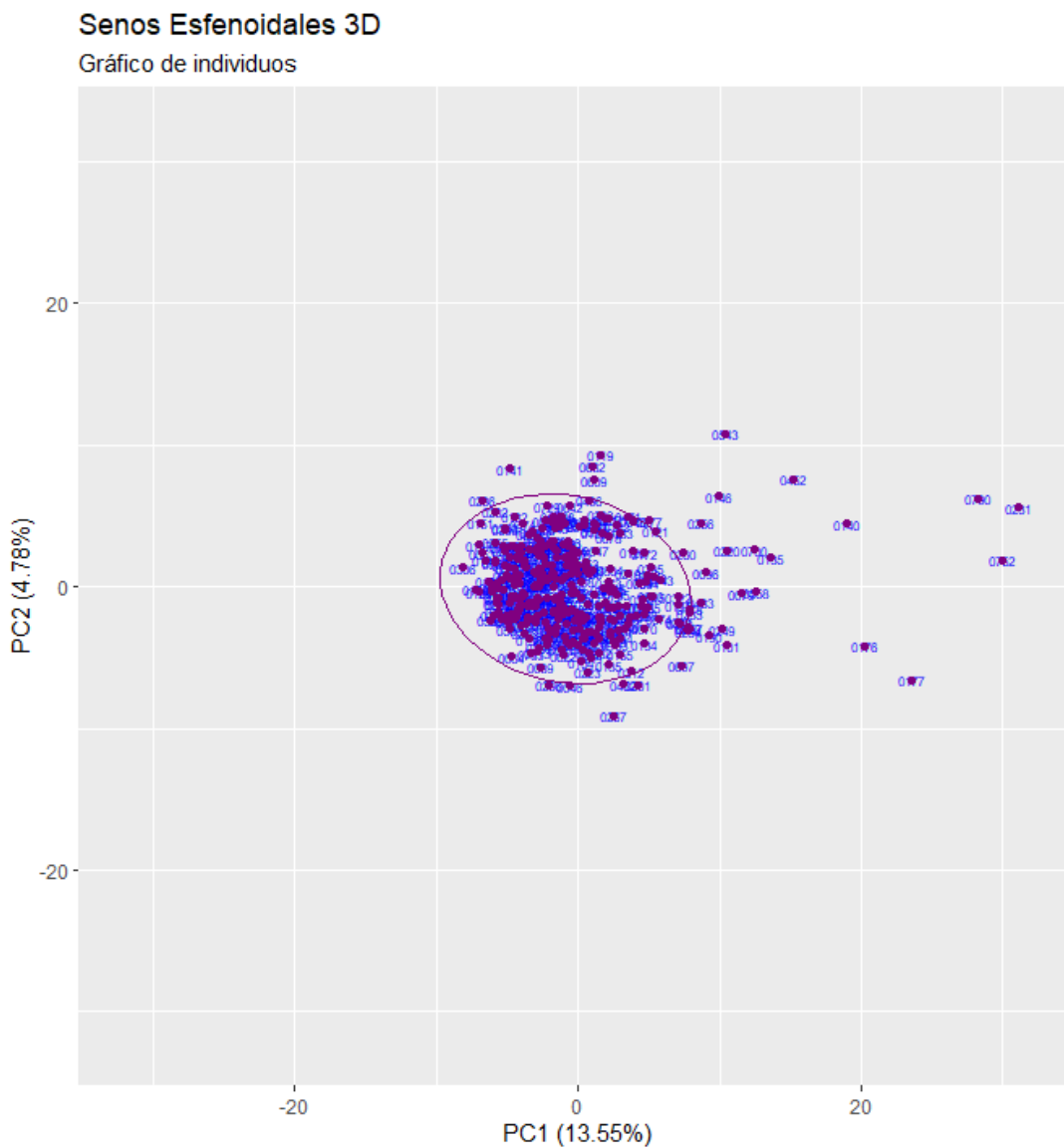


Figura 39. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC2) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

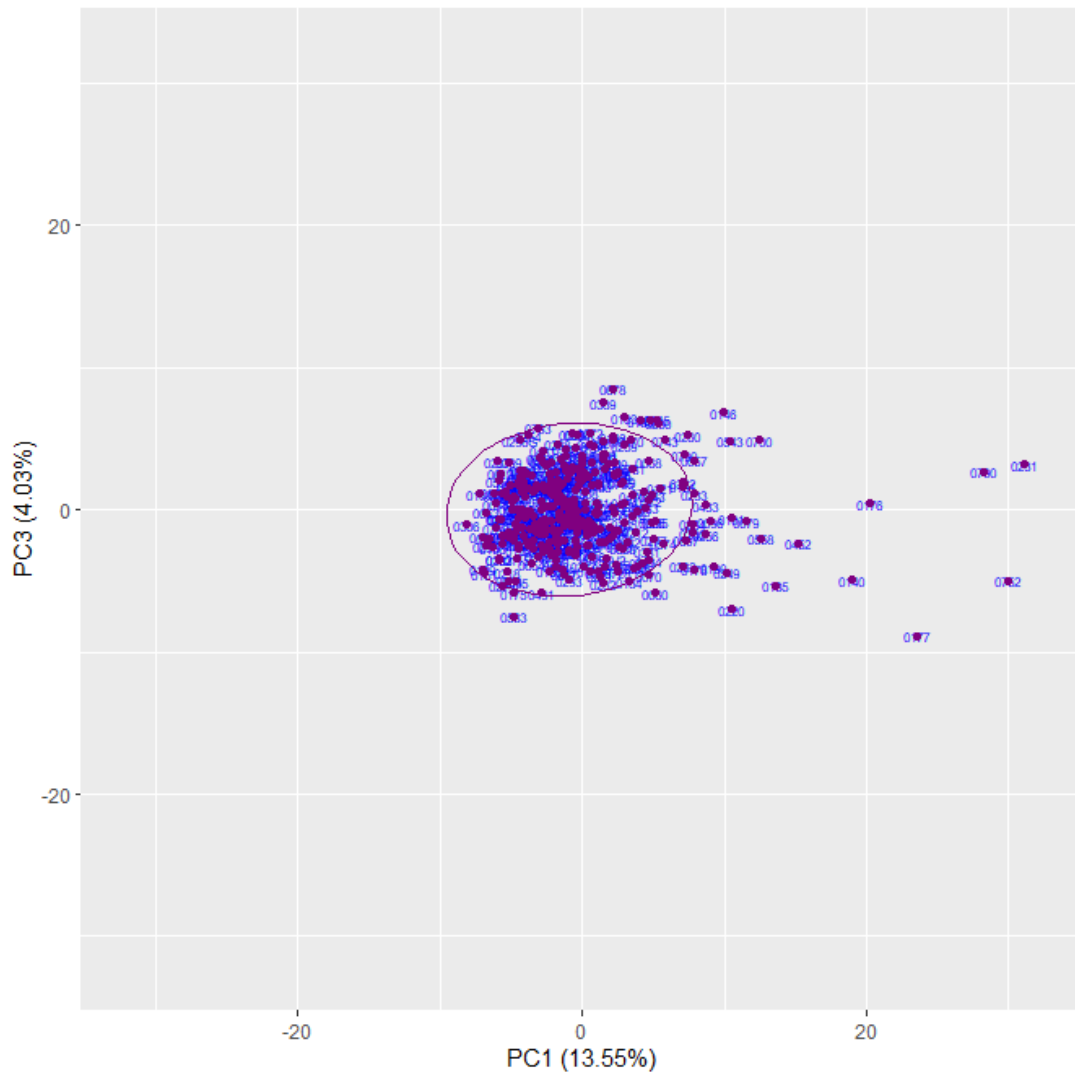


Figura 40. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC3) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

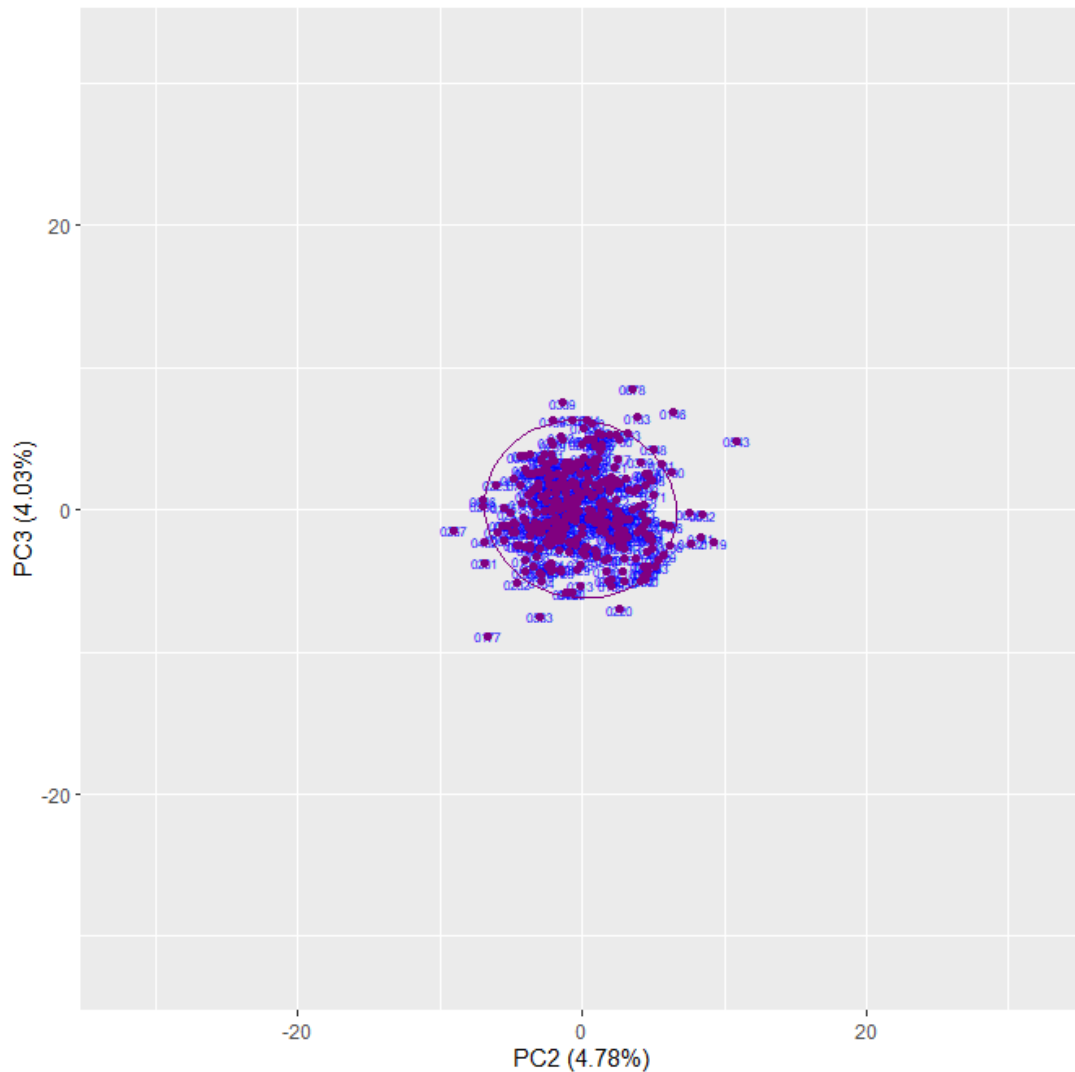


Figura 41. Gráfico del morfoespacio (PC2 y PC3) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

En el primer componente, la variación morfológica la delimitan los individuos 0306 y 0231, en los extremos negativo y positivo, respectivamente. La segunda dimensión del PCA está explicada en sus extremos negativo y positivo por los individuos 0267 y 0543. Por último, los ejes negativo y positivo del PC3 están descritos por el individuo 0177 y el individuo 0678.

La Figura 42 representa el cambio morfológico en la primera dimensión del PCA. El eje negativo tiende a senos esfenoidales bilaterales, cuya área de pneumatización se

extiende y aumenta en sentido posteroanterior; además, en general se observa un mayor volumen de aire que en el PC1+. Este mismo, por el contrario, está descrito por unos senos esfenoidales unilaterales, con un área y extensión pneumática mucho menor a lo observado en el extremo negativo, y cuyo eje de mayor longitud también se halla en sentido inferosuperior.

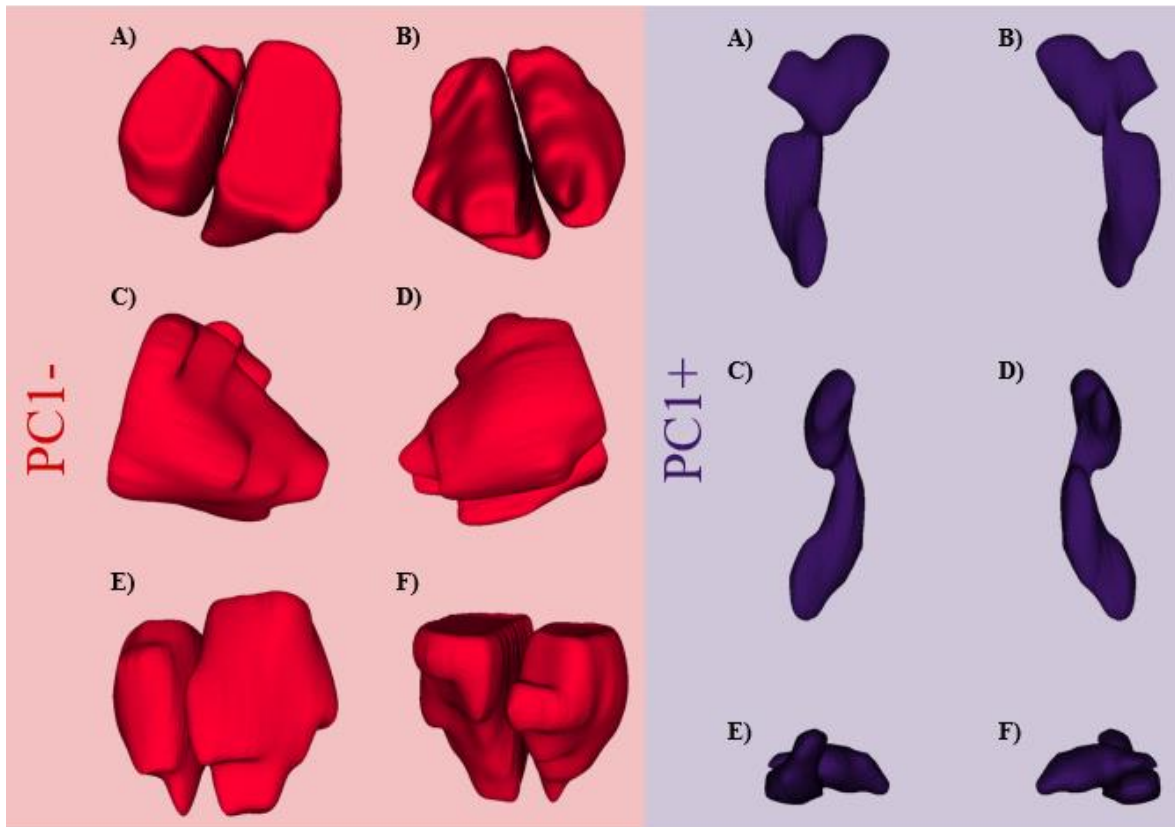


Figura 42. Extremos del PC1- (izquierda) y PC1+ (derecha) representados por los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales de los individuos 0306 (rojo) y 0231 (morado). Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

En la Figura 43, el PC2 está definido en su extremo negativo por senos esfenoidales bilaterales, en este caso, el área de la pneumatización aumenta en sentido posteroanterior (pero su extensión es menor a la mostrada en el PC1-); además, ambos hemisenos se extienden en dirección laterolateral. El extremo positivo está caracterizado nuevamente por un seno esfenoidal unilateral; en general, el volumen de su pneumatización es menor (se comprime en sus planos axial y coronal), pero también se alarga en sentido laterolateral.

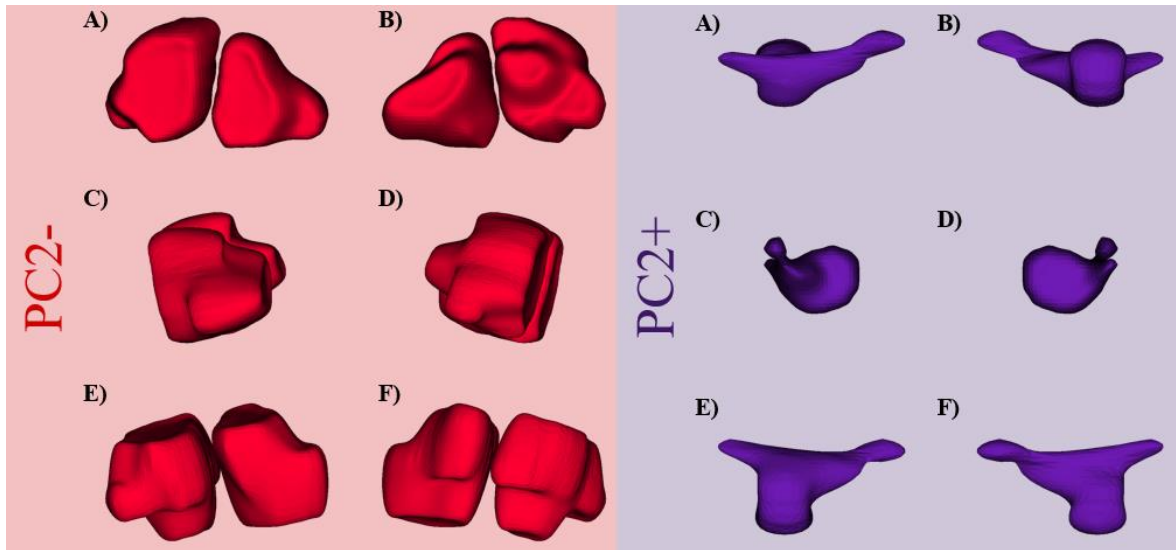


Figura 43. Extremos del PC2- (izquierda) y PC2+ (derecha) representados por los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales de los individuos 0267 (rojo) y 0543 (morado). Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

Finalmente, el PC3- guarda una morfología más esférica en ambos hemisenos, no obstante, el hemiseno izquierdo muestra un volumen de pneumatización mayor que el hemiseno derecho; una distinción notable respecto a los senos bilaterales de los primeros dos componentes es que aquí los hemisenos mantienen una mayor distancia de separación entre sí, por tanto, su eje de mayor longitud en vista anterior es laterolateral (considerando ambos hemisenos). En esta línea de análisis morfoscópio, el PC3+ exhibe unos senos esfenoidales bilaterales, una característica relevante teniendo en cuenta la morfología de los extremos positivos de los primeros dos componentes (ya que estos presentaban sólo un seno unilateral); otra diferencia radica en el volumen de los hemisenos, hallándose a la inversa de lo expuesto en el PC3- (siendo mayor en la porción derecha y menor en la porción izquierda). El área y extensión de la pneumatización en el PC3+ sigue un patrón de crecimiento en dirección posteroanterior y, en general, los senos esfenoidales muestran un volumen mayor sobre el eje positivo de este componente que en su eje negativo. El eje de mayor longitud de los senos esfenoidales en el PC3+ conserva una extensión en sentido laterolateral y hacia los procesos pterigoideos.

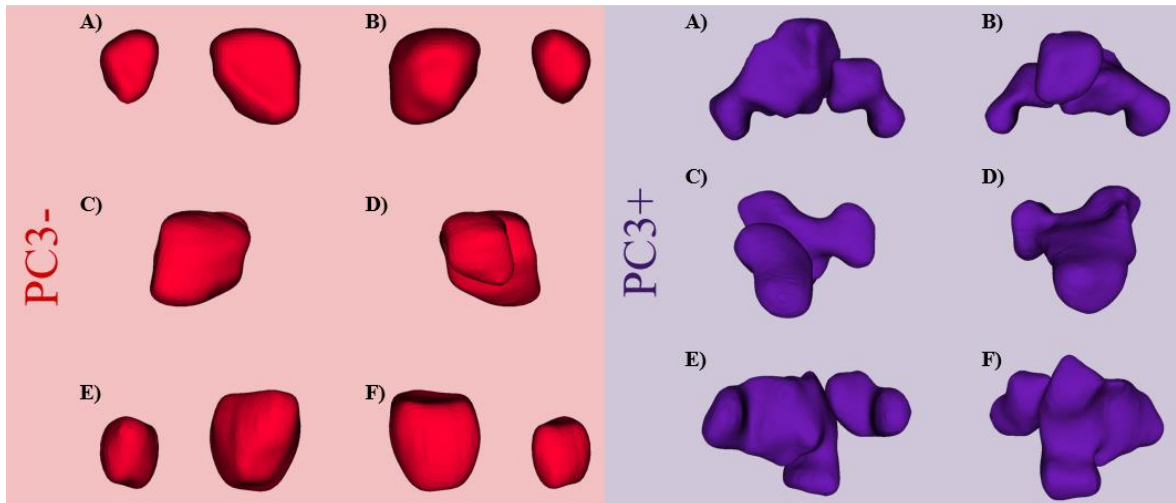


Figura 44. Extremos del PC3- (izquierda) y PC3+ (derecha) representados por los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales de los individuos 0177 (rojo) y 0678 (morado). Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

Empleando la forma media como modelo de referencia

Para este análisis, se seleccionó la forma más cercana a la media de la muestra ($n = 348$), es decir, el individuo 0308, obtenida del PCA sin repeticiones, con el objetivo de evaluar la presencia de variación en los resultados. La varianza total computada fue 93.633, diferida en un porcentaje de 23.12% a lo largo de los primeros tres componentes principales y concentrando el 95.06% de dicha varianza hasta el PC252; 26 componentes principales acumularon menos del 1% de varianza.

La Figura 45, Figura 46 y Figura 47 presentan los morfoespacios del PCA ajustados en relación con el método GPSA, empleando la forma media (individuo 0308) como el modelo de referencia, a diferencia de la prueba base, donde se utilizó el individuo 0073.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

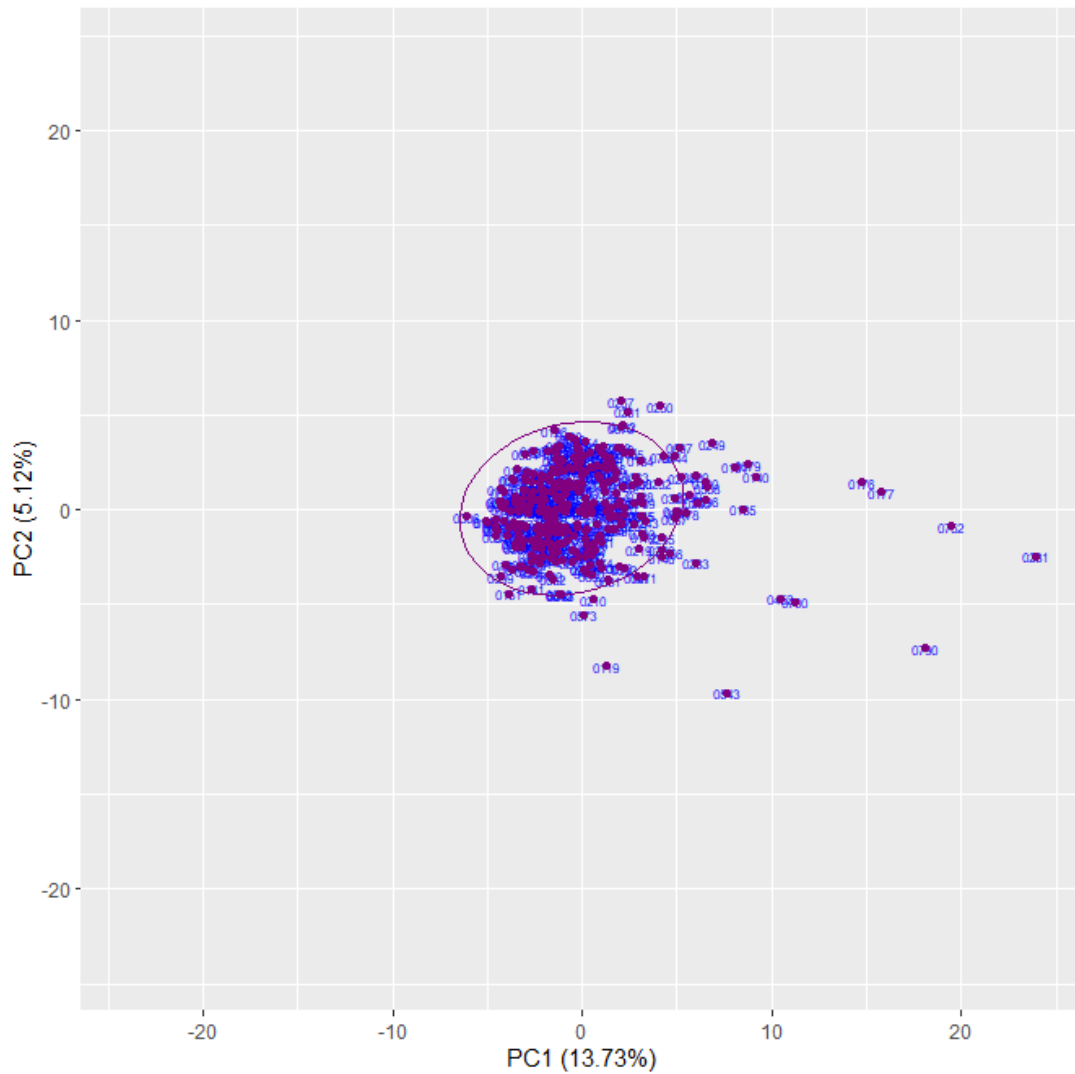


Figura 45. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC2) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA, utilizando como modelo de referencia la forma cercana a la media. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

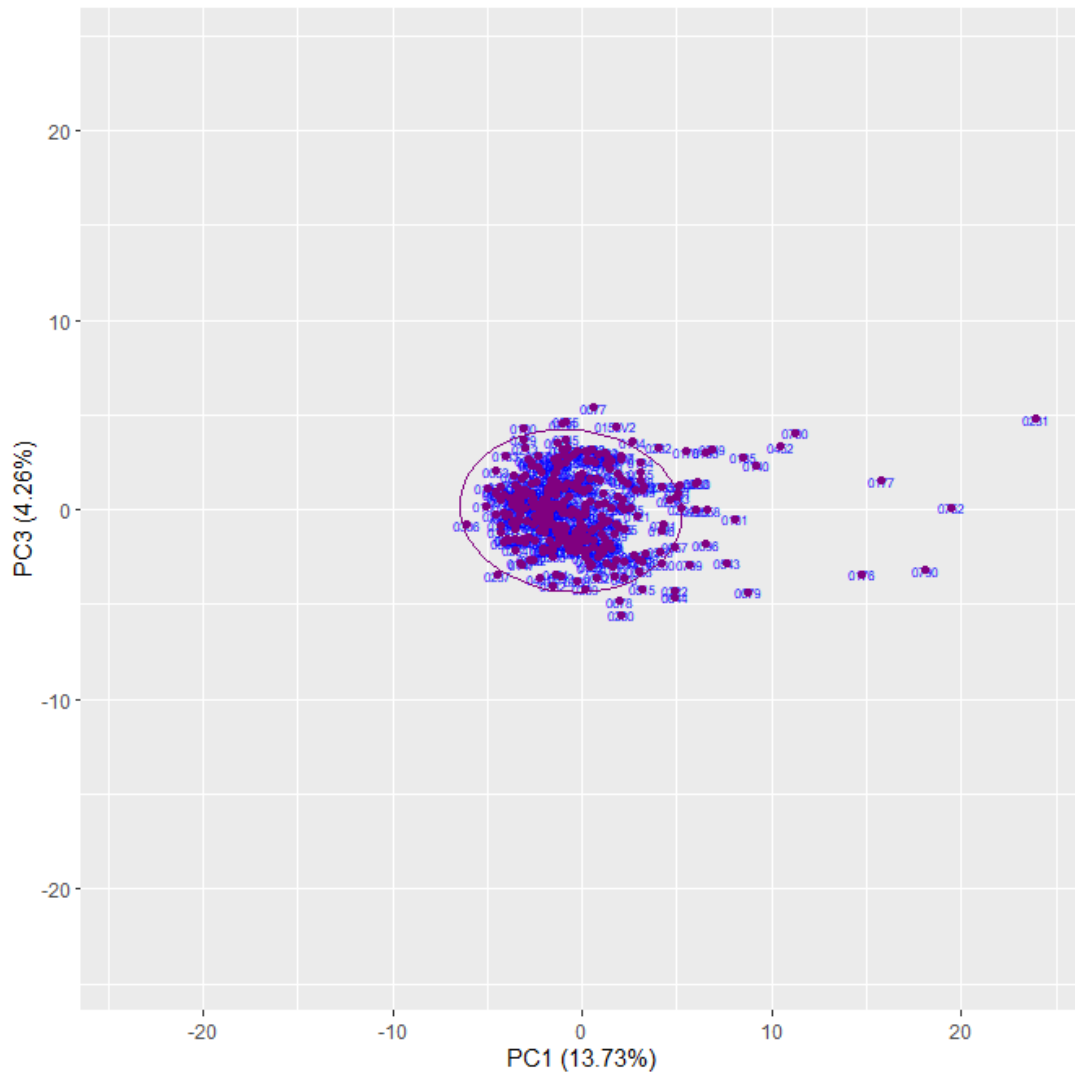


Figura 46. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC3) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA, utilizando como modelo de referencia la forma cercana a la media. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

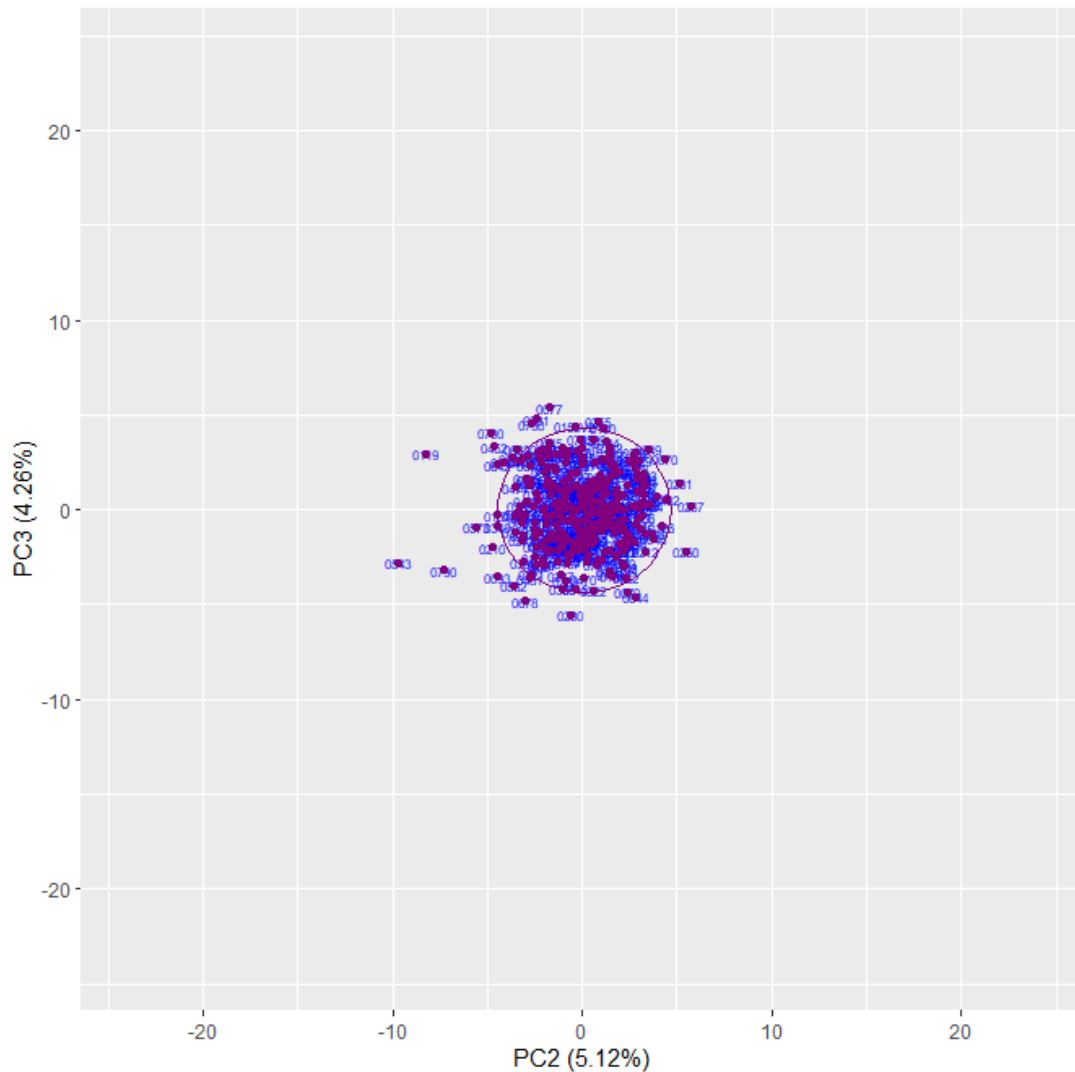


Figura 47. Gráfico del morfoespacio (PC2 y PC3) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA, utilizando como modelo de referencia la forma cercana a la media. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

La primera dimensión de este PCA está definida en sus ejes negativo y positivo por los individuos 0306 y 0231, respectivamente. La segunda dimensión está caracterizada por el individuo 0543, en el extremo negativo, y el individuo 0267, en el extremo positivo. En la tercera dimensión, los ejes negativo y positivo están delimitados por los individuos 0230 y 0077.

En comparación con el análisis principal sin repeticiones, no hay una diferencia sustancial en la variación morfológica del PCA, ya que los rangos de dicha variación se mantuvieron entre los mismos individuos en los dos primeros componentes principales. El único componente que presenta un cambio es el tercero (Figura 48). En su eje negativo, el individuo 0230 muestra unos senos esfenoidales bilaterales, ambos hemisenos mantienen una morfología irregular pero un volumen homogéneo; la extensión y área de la pneumatización incrementa en sentido posteroanterior y superoinferior, ampliando su eje de mayor longitud en dirección laterolateral y hacia los procesos pterigoideos (similar al PC3+ del primer PCA sin iteraciones). En cuanto al eje positivo del PC3, el individuo 0077 también posee unos senos esfenoidales bilaterales, no obstante, cada hemiseno mantiene una mayor distancia entre sí que en el eje negativo, además, el volumen y extensión pneumática es mayor en la porción derecha que en la izquierda, pero el eje de mayor amplitud sigue siendo laterolateral. Contrario a los senos esfenoidales del extremo negativo, la morfología de los hemisenos es menos irregular y no se extiende sobre los laterales.

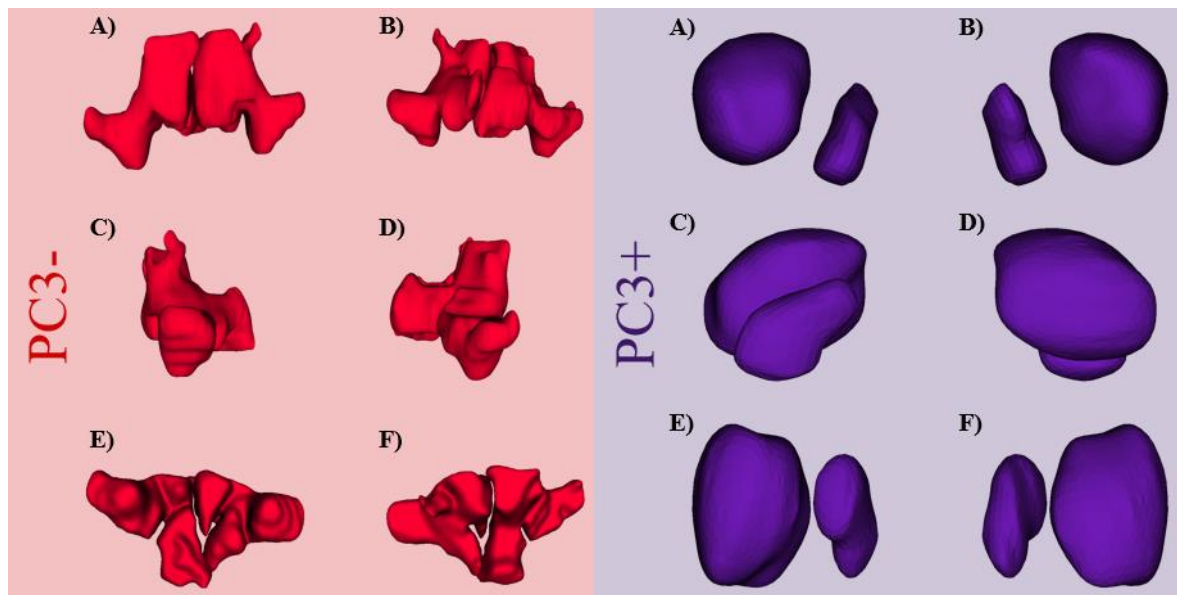


Figura 48. Extremos del PC3- (izquierda) y PC3+ (derecha) representados por los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales de los individuos 0230 (rojo) y 0077 (morado). Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

Anidación de la muestra en senos esfenoidales bilaterales

Para evaluar las diferencias en el método debido a la presencia de los dos grupos principales de senos esfenoidales, se dividió la muestra en senos esfenoidales bilaterales y senos esfenoidales unilaterales. Primero se llevó a cabo un PCA en el *software RStudio*, con las coordenadas homologadas por GPSA de los senos esfenoidales bilaterales (empleando al individuo 0181 como modelo de referencia, al ser el modelo con mejor definición en su estructura), esto resultó en una varianza total de 349.8772, acumulando el 22.22% en los primeros tres componentes principales y el 95.07% hasta el PC219; 19 componentes principales concentraron el 0.947% de la varianza (< 1%).

En la Figura 49, Figura 50 y Figura 51 se explora el morfoespacio de los primeros tres componentes principales y la distribución de los individuos en el mismo.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

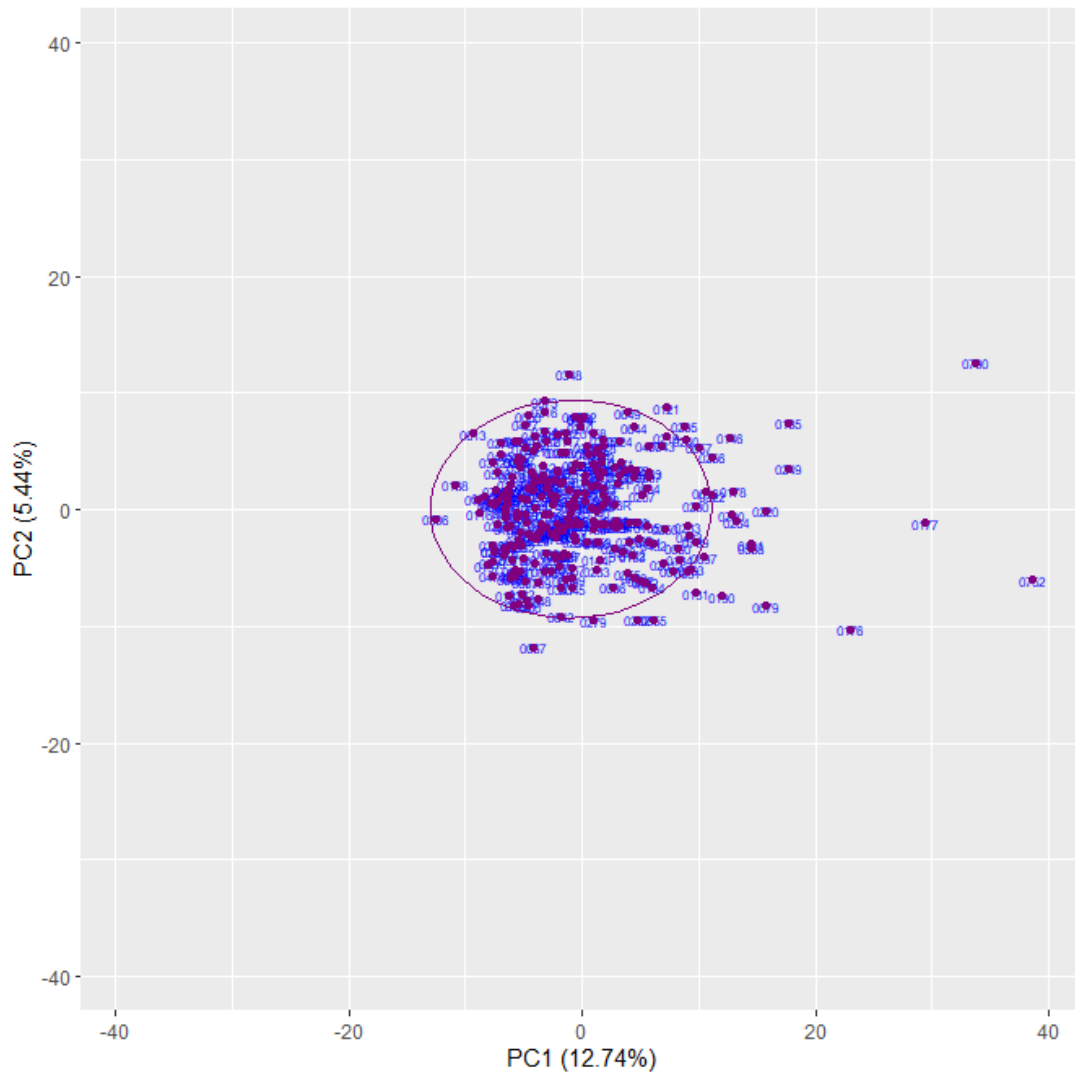


Figura 49. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC2) de los individuos con senos esfenoidales bilaterales (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

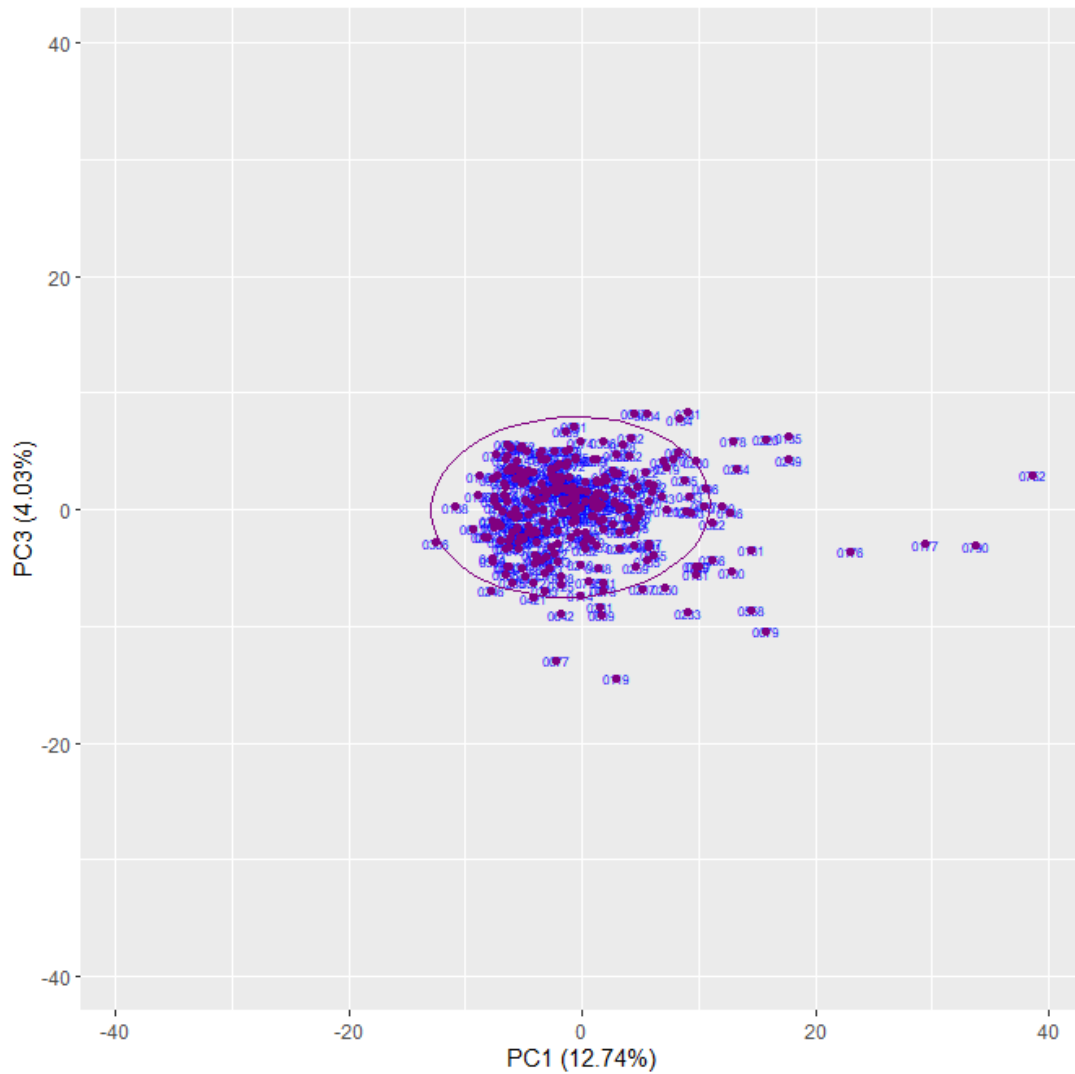


Figura 50. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC3) de los individuos con senos esfenoidales bilaterales (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

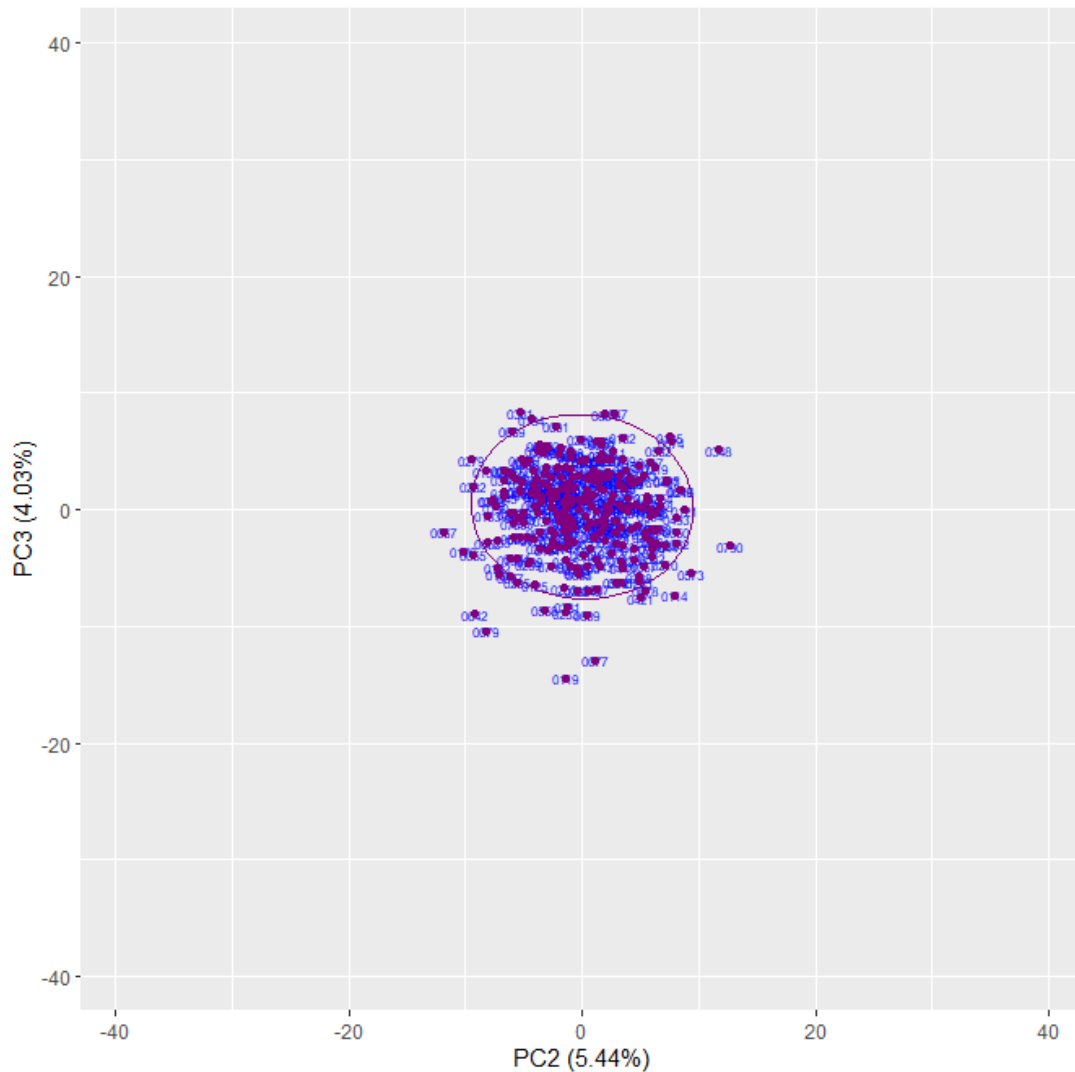


Figura 51. Gráfico del morfoespacio (PC2 y PC3) de los individuos con senos esfenoidales bilaterales (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

La caracterización de los extremos negativo y positivo de la variación morfológica en estos tres ejes está dada por los individuos 0306 y 0752 en la primera dimensión, los individuos 0067 y 0790 en la segunda dimensión, y los individuos 0119 y 0331 en la tercera dimensión, respectivamente.

El primer componente (Figura 52), en su eje negativo, presenta unos senos esfenoidales cuya pneumatización se extiende y aumenta en área en dirección

posteroanterior, el hemiseno del lado derecho cuenta con un ápice en su plano posterior. El extremo negativo posee más invaginaciones que su contraparte positiva, sobre todo en su plano posterosuperior; en general, los hemisenos del extremo negativo son más voluminosos que los del extremo positivo. El extremo positivo, por el contrario, muestra unos senos bilaterales cuyos hemisenos se hallan más separados entre sí, estableciendo su eje de mayor longitud en sentido laterolateral. Estos senos, además, son más estrechos en su plano coronal y tienen una superficie menos irregular, más lisa que el individuo 0306, sólo exteriorizando un tubérculo sobre su plano anterior.

Se destaca que el individuo 0306 también caracteriza el extremo negativo del PC1 en los análisis originales sin repeticiones y con repeticiones, y empleando la forma media como modelo de referencia, lo cual indica un patrón que se conserva en la variación morfológica.

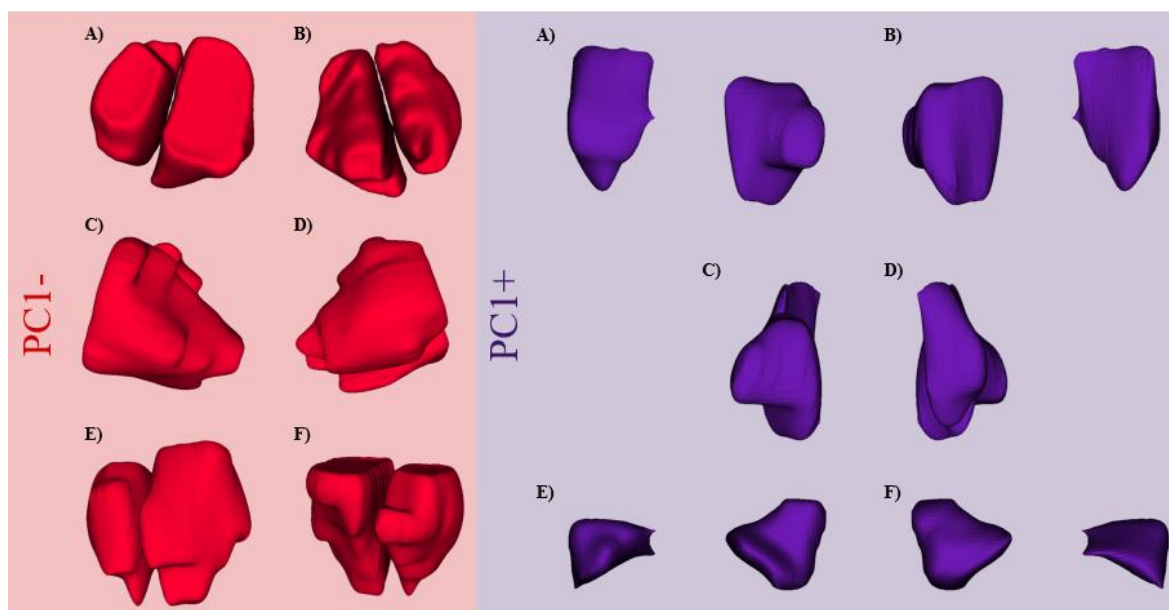


Figura 52. Extremos del PC1- (izquierda) y PC1+ (derecha) representados por los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales bilaterales de los individuos 0306 (rojo) y 0752 (morado). Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

La variación de la forma en el eje negativo del componente dos (Figura 53) está representada por los senos esfenoidales del individuo 0067, cuyos hemisenos varían en morfología y volumen. El hemiseno derecho tiene menor volumen, donde el área y la extensión de su pneumatización se da en un sentido superoinferior, siendo este su eje mayor; siendo menos voluminoso en su plano coronal. El hemiseno izquierdo expone una

mayor extensión pneumática sobre su eje posteroanterior y una reducción de volumen en sentido inferosuperior; su eje mayor se extiende en dirección laterolateral. A diferencia del extremo negativo, el individuo 0790 caracteriza el eje positivo del componente dos (Figura 53) con unos senos esfenoidales bilaterales que mantienen una mayor separación entre sus hemisenos, su superficie es más regular y lisa, presentando menos invaginaciones; además, son más aplanados en su plano coronal; sin embargo, el hemiseno derecho sigue estando más alargado axialmente, mientras el hemiseno izquierdo conserva su extensión en sentido laterolateral.

Cabe mencionar que el individuo 0790 también caracteriza el extremo positivo del segundo componente en el análisis sin repeticiones por el método ALPACA.

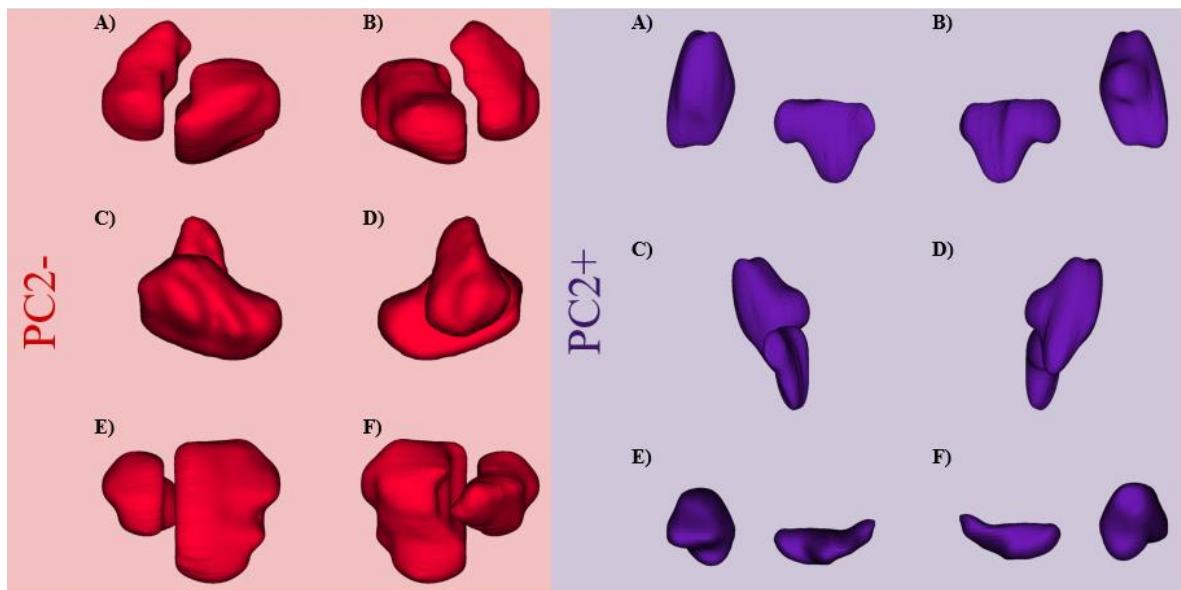


Figura 53. Extremos del PC2- (izquierda) y PC2+ (derecha) representados por los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales bilaterales de los individuos 0067 (rojo) y 0790 (morado). Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

En la Figura 54 se observan los extremos de la variación morfológica en el PC3. El eje negativo está caracterizado por el individuo 0119, cuyos senos esfenoidales presentan una forma irregular en sus hemisenos y varias invaginaciones o valles y agujeros en general; el hemiseno derecho está más desplazado en sentido anterior que el hemiseno izquierdo, está más aplanado sobre su plano coronal, pero es más alargado en sentido laterolateral. El hemiseno izquierdo cuenta con un mayor volumen y extensión posteroanterior, pero está más comprimido en su plano sagital; el eje mayor de los senos en general es laterolateral. La morfología del individuo 0331 en el extremo positivo del PC3 es

más homogénea entre ambos hemisenos, al igual que su volumen; ambos hemisenos presentan menos invaginaciones y no tienen agujeros, a diferencia del individuo 0119; en general, su superficie es más lisa, sobre todo en su plano anterior, exponiendo un conjunto de ápices en su plano posterior; sin embargo, su eje mayor sigue siendo el laterolateral, comprimiéndose su volumen en el plano coronal. Otra diferencia notable respecto al extremo negativo es que el hemiseno izquierdo es el que se encuentra ligeramente desplazado hacia el plano anterior.

Contrario a los análisis anteriores, los individuos 0119 y 0331 no caracterizan otros componentes en los resultados.

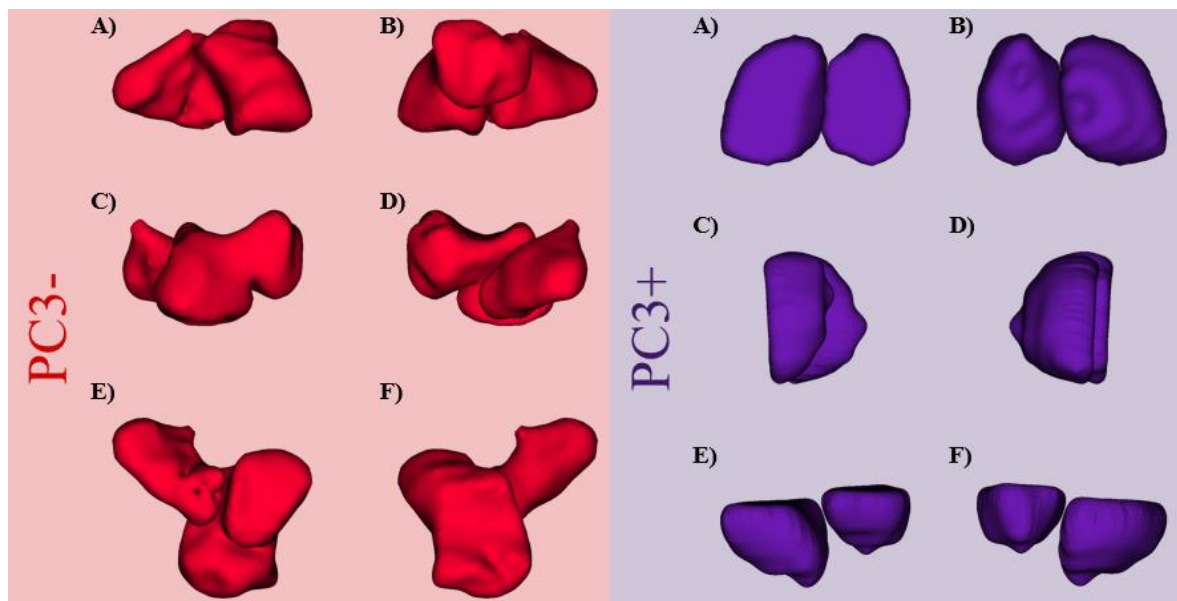


Figura 54. Extremos del PC3- (izquierda) y PC3+ (derecha) representados por los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales bilaterales de los individuos 0119 (rojo) y 0331 (morado). Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

Anidación de la muestra en senos esfenoidales unilaterales

Como en análisis previos, se realizó un PCA con las coordenadas homologadas obtenidas por medio del *software gpsa*, importando los datos en *RStudio*. Se empleó el modelo de mayor resolución (individuo 0284) como el modelo de referencia. Se calculó una varianza total de 305.9208, el 35.39% concentrada en los primeros tres componentes principales, el 95.46% acumulado hasta el PC47 y cuatro componentes principales recopilando menos del 1% de la varianza (0.675%).

En la Figura 55, Figura 56 y Figura 57 se explora la distribución de los individuos en el morfoespacio de los primeros tres componentes principales.

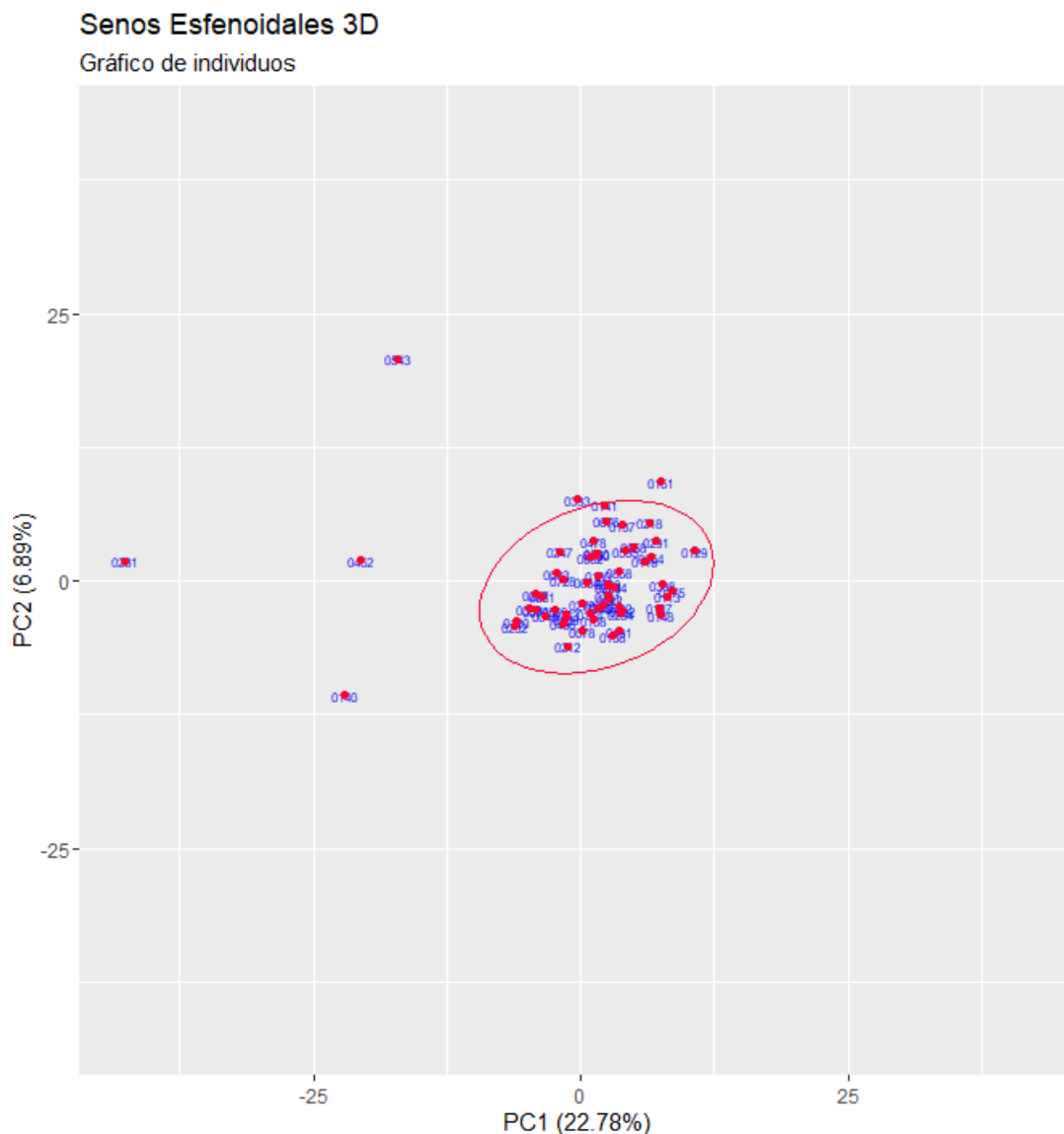


Figura 55. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC2) de los individuos con senos esfenoidales unilaterales (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

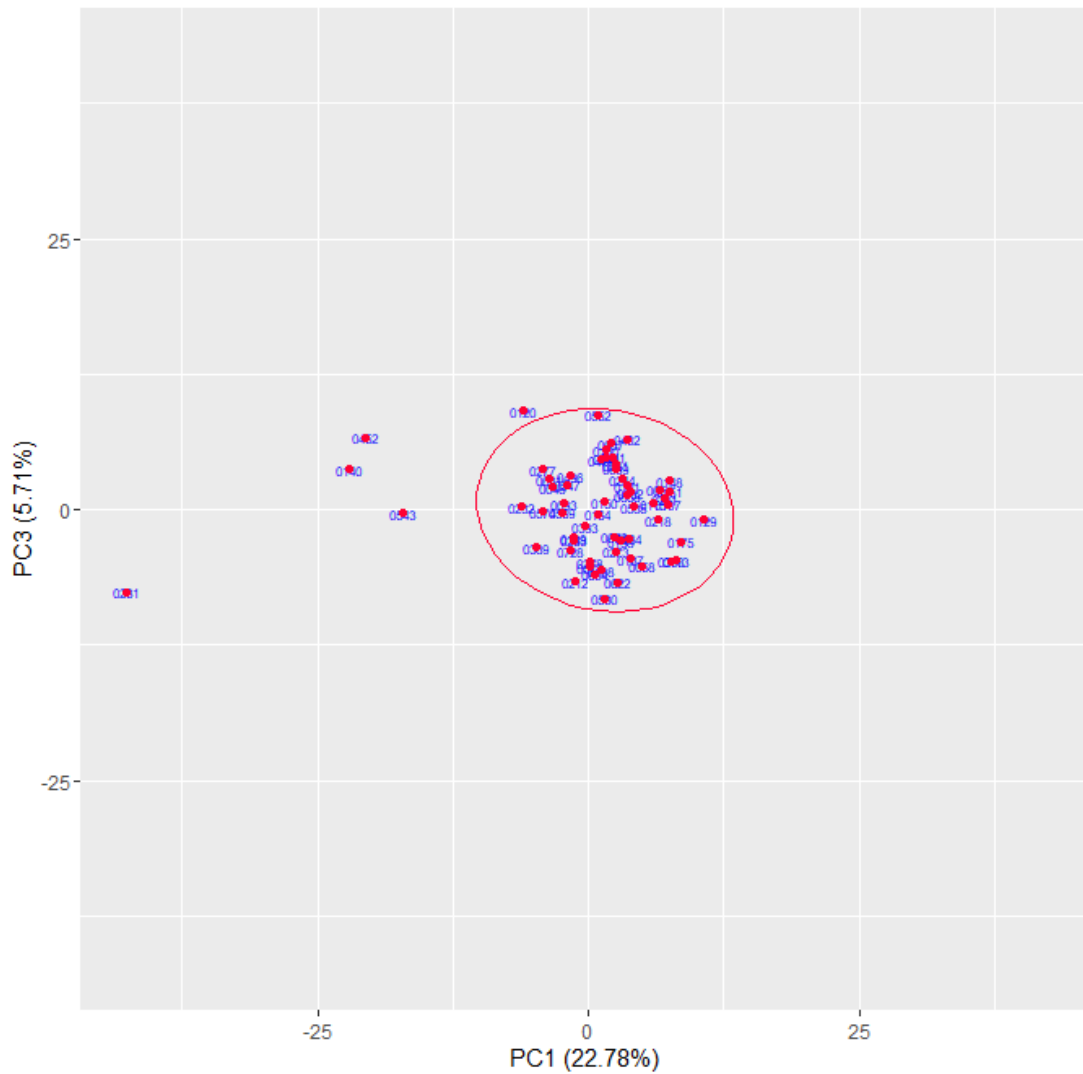


Figura 56. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC3) de los individuos con senos esfenoidales unilaterales (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

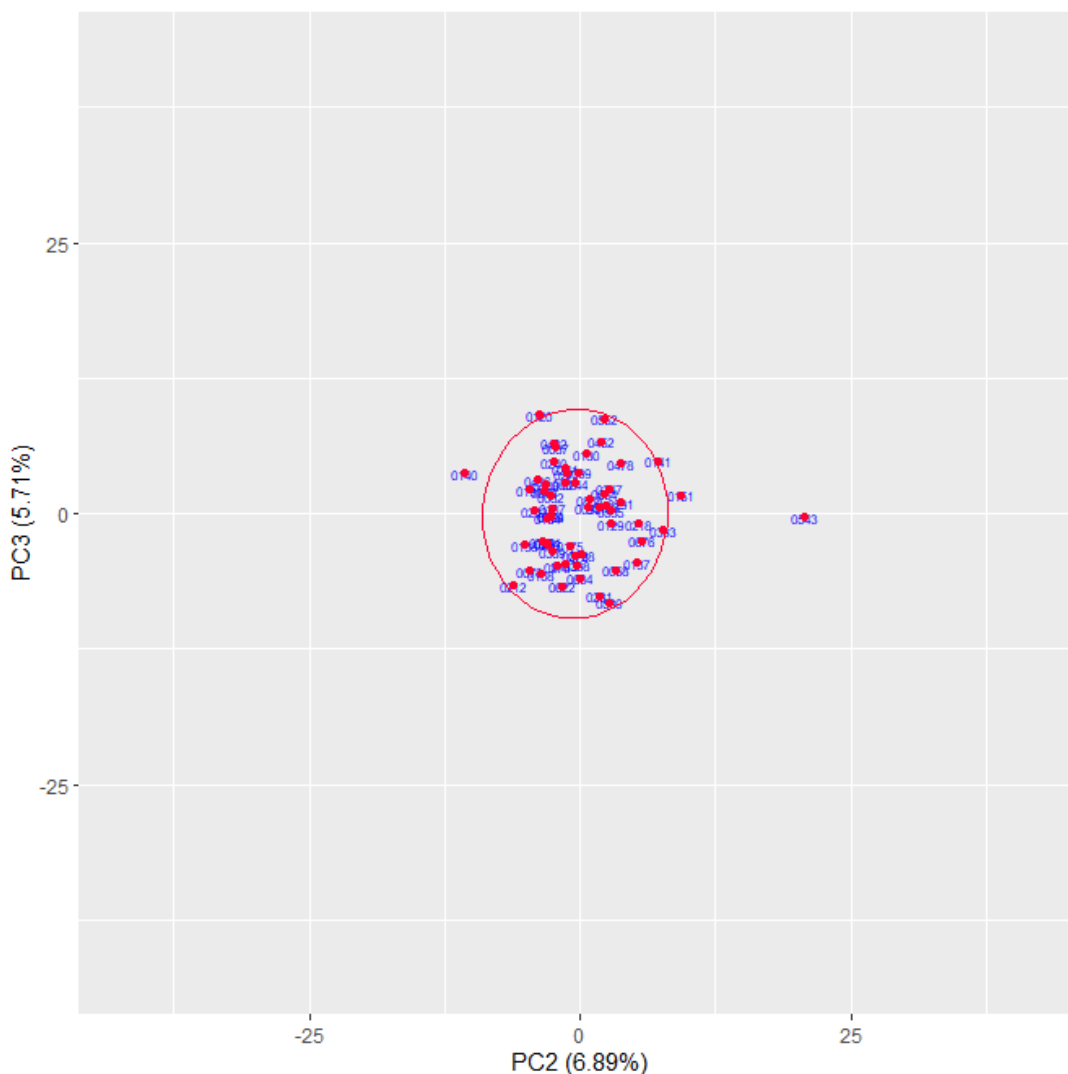


Figura 57. Gráfico del morfoespacio (PC2 y PC3) de los individuos con senos esfenoidales unilaterales (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

La variación morfológica se encuentra definida por los componentes adyacentes, cada eje está representado por los individuos en su respectivo extremo. El PC1 negativo lo delimita el individuo 0231 y el PC1 positivo lo define el individuo 0129. El PC2 negativo y positivo está caracterizado por los individuos 0140 y 0543, respectivamente. Finalmente, el PC3 negativo y su contraparte positiva lo establecen el individuo 0530 y 0120, en ese orden.

En la Figura 58 se observa la morfología del extremo negativo del PC1, como se ha descrito anteriormente, los senos esfenoidales del individuo 0231 son unilaterales, su pneumatización es irregular, son alargados en su eje inferosuperior y estrechos en su eje laterolateral. El individuo 0129 en el extremo positivo del PC1, por el contrario, mantiene una forma con un volumen de aire mayor, es más homogénea y se caracteriza por contar con un ápice o vértice en su plano posterior, cuya extensión pneumática incrementa en general con un sentido posteroanterior, aunque su eje de mayor longitud sigue siendo el axial.

Un detalle destacable es que el individuo 0231 caracterizaba el extremo positivo del primer componente principal del PCA general sin repeticiones, con repeticiones y al emplear la forma media como modelo de referencia.

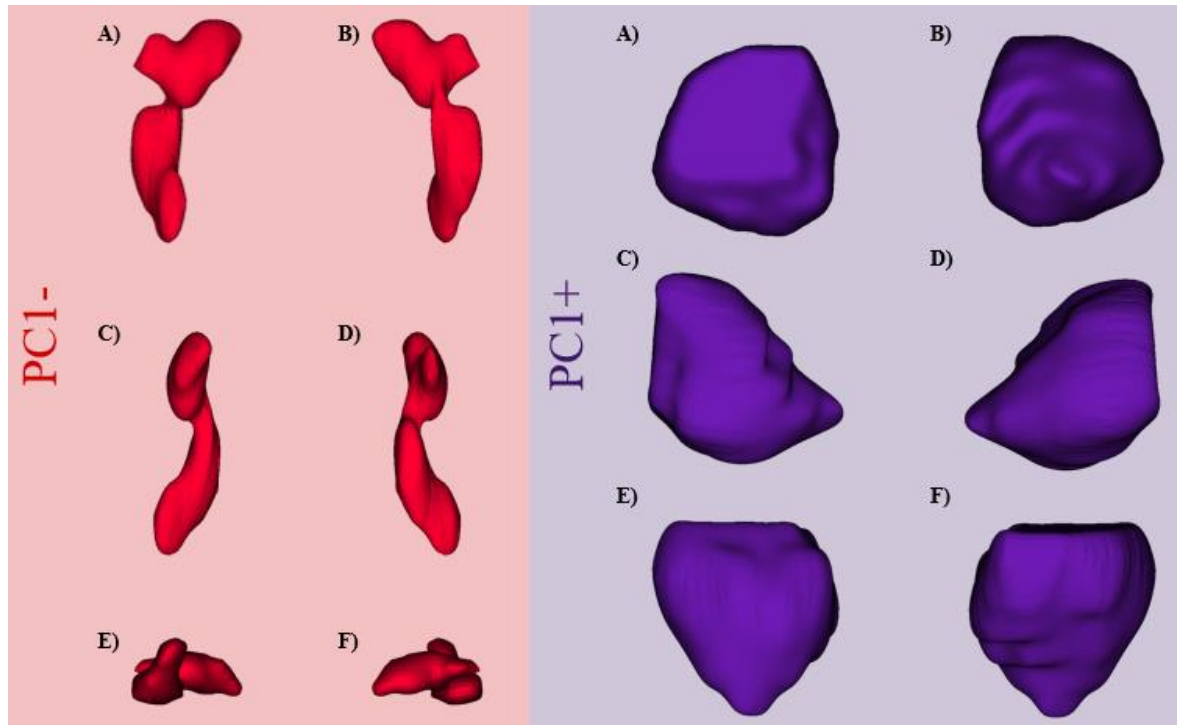


Figura 58. Extremos del PC1- (izquierda) y PC1+ (derecha) representados por los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales unilaterales de los individuos 0231 (rojo) y 0129 (morado). Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

La Figura 59 muestra la variación morfológica en la segunda dimensión del PCA. El individuo 0140 representa unos senos esfenoidales aplanados en su plano axial y extendidos en sentido laterolateral, siendo este su eje de mayor longitud; su pneumatización tiene un volumen mayor que el PC2+. El individuo 0543, en el eje positivo de este PC2, se

caracteriza por su pneumatización, cuya área aumenta en dirección posteroanterior y laterolateralmente, teniendo su eje mayor también sobre su plano sagital; al igual que el individuo 0140, su plano axial está comprimido.

Cabe resaltar que el individuo 0543 también caracterizaba extremos del segundo componente en el PCA sin repeticiones, con repeticiones y utilizando la forma media como el modelo de referencia.

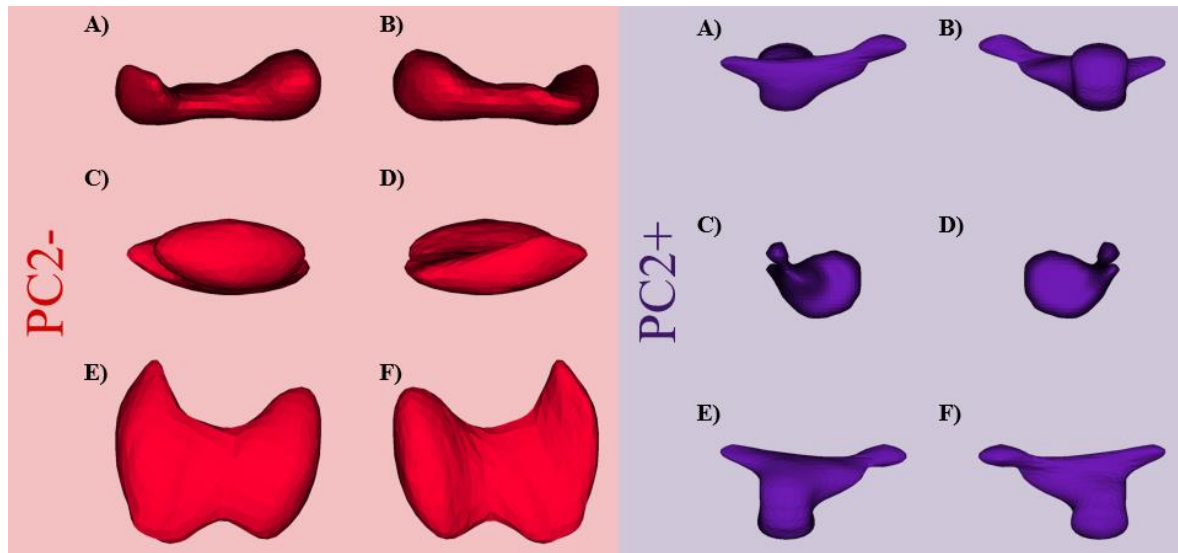


Figura 59. Extremos del PC2- (izquierda) y PC2+ (derecha) representados por los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales unilaterales de los individuos 0140 (rojo) y 0543 (morado). Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

La variación morfológica de la tercera dimensión se presenta en la Figura 60. En el eje negativo, el individuo 0530 muestra unos senos esfenoidales con mayor extensión laterolateral y tienen una forma más homogénea que la observada en el extremo positivo, presentando menos invaginaciones y agujeros topológicos; en cambio, el individuo 0120, que caracteriza el eje PC3+, exhibe unos senos esfenoidales con una pneumatización y extensión más irregular, aumentando su área en dirección posteranterior y teniendo una mayor cantidad de invaginaciones y agujeros; su eje axial es mayor que el del individuo 0530.

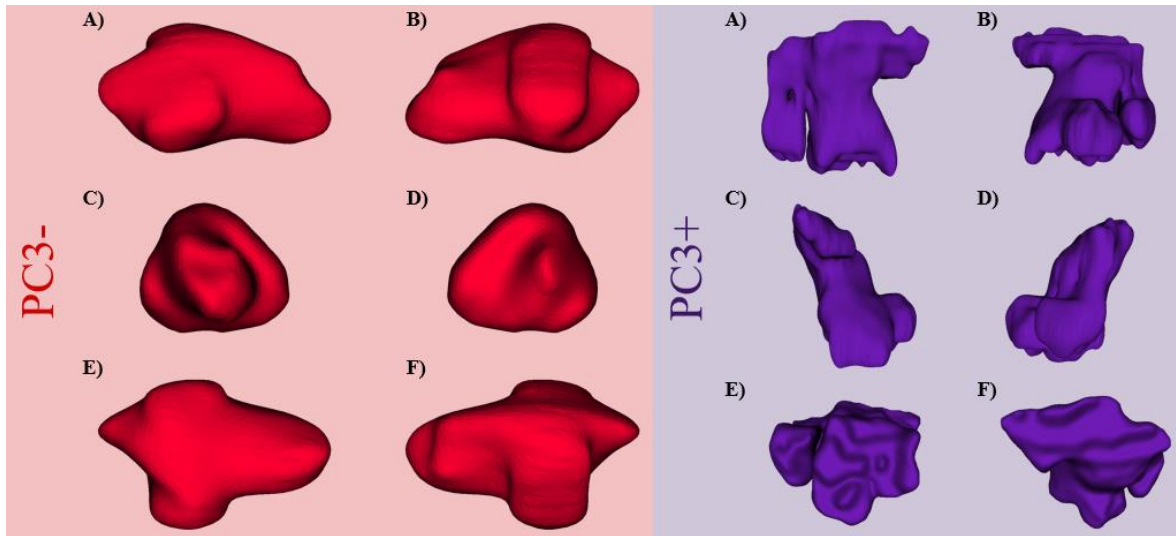


Figura 60. Extremos del PC3- (izquierda) y PC3+ (derecha) representados por los modelos tridimensionales de los senos esfenoidales unilaterales de los individuos 0530 (rojo) y 0120 (morado). Vista: A) anterior, B) posterior, C) lateral izquierda, D) lateral derecha, E) inferior y F) superior.

Exploración de grupos por sexo

De acuerdo con Strauss (2010), el análisis de componentes principales (PCA) se emplea con frecuencia por investigadores para intentar discriminar entre grupos de individuos; no obstante, el PCA es una técnica de un solo grupo y no asegura el hallazgo de diferencias intergrupales (aún si están presentes dentro de la muestra). Por otro lado, si la variación intergrupala es mayor que la variación intragrupal, los gráficos de dispersión o morfoespacios podrían llegar a exponer diferencias grupales. Debido a estos argumentos, se consideró realizar un PCA sólo como técnica de exploración preliminar para los datos.

En el caso del sexo, las elipses que concentran a la muestra por grupos se superponen, por lo que no hay una clara distinción entre los individuos de sexo femenino y los individuos de sexo masculino, siendo mayor la variación caracterizada por el primer grupo en los componentes principales 1 y 2, como se muestra en la Figura 61, Figura 62 y Figura 63. El tercer componente representa ligeramente una mayor variación para los individuos de sexo masculino.



Figura 61. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC2) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. Los grupos por sexo están señalados por formas y colores: círculos rosas para los individuos femeninos (F) y triángulos azules para los individuos masculinos (M). En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de las elipses se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas para su grupo. Las elipses se dibujaron con un nivel de confianza del 95% para cada una. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

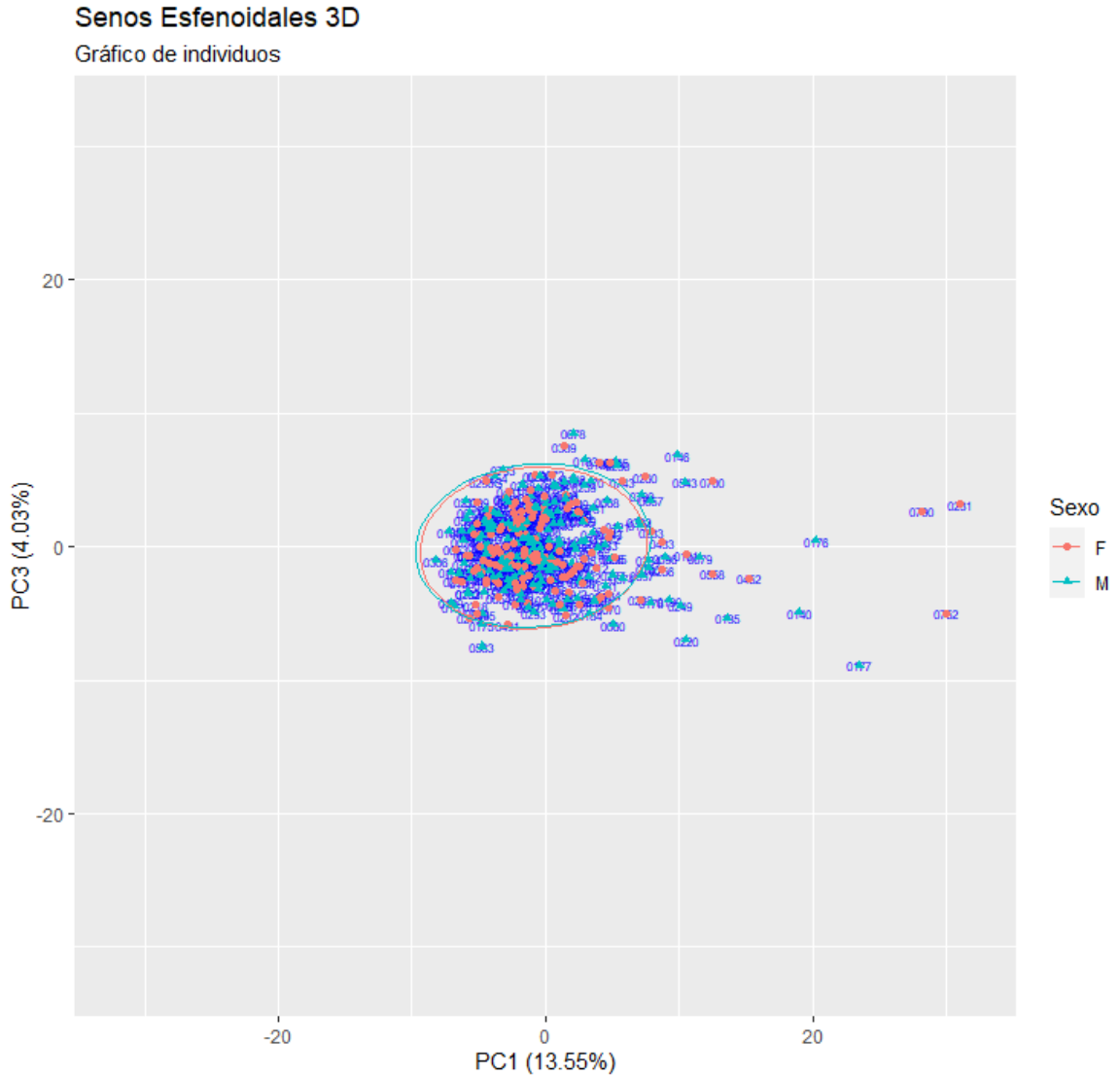


Figura 62. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC3) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. Los grupos por sexo están señalados por formas y colores: círculos rosas para los individuos femeninos (F) y triángulos azules para los individuos masculinos (M). En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de las elipses se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas para su grupo. Las elipses se dibujaron con un nivel de confianza del 95% para cada una. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

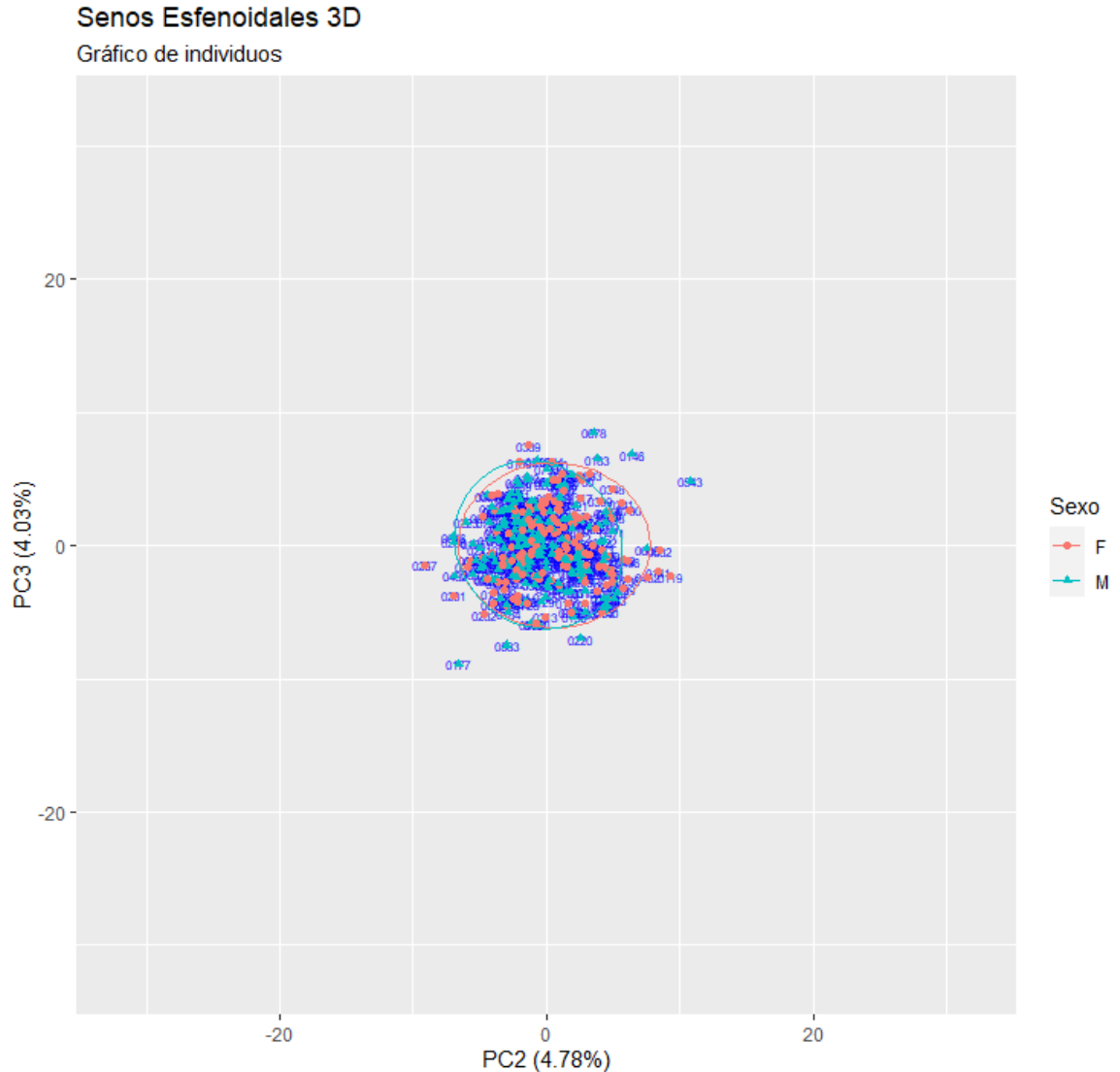


Figura 63. Gráfico del morfoespacio (PC2 y PC3) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. Los grupos por sexo están señalados por formas y colores: círculos rosas para los individuos femeninos (F) y triángulos azules para los individuos masculinos (M). En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de las elipses se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas para su grupo. Las elipses se dibujaron con un nivel de confianza del 95% para cada una. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Exploración de grupos por edad

Para este análisis, se retomó la clasificación descrita por Landi & O'Higgins (2019) en tres grupos principales según la edad: niños (< 6 años), juveniles (entre ≥ 6 años y < 18 años), y adultos (≥ 18 años). Sin embargo, a diferencia de la muestra de los autores, aquí no se encontró ningún individuo que cumpliera con la clasificación para niños (salvo por un individuo que se eliminó de la muestra, al tener un dato erróneo sobre su edad), por tanto,

sólo se consideraron juveniles y adultos. En los resultados de la Figura 64, Figura 65 y Figura 66 no se visualiza una discriminación evidente entre grupos. Los individuos adultos concentran una mayor variación en el PC1, mientras que el PC2 caracteriza una mayor variación para los individuos juveniles, hallándose una distribución más homogénea de los grupos en el eje del PC3.

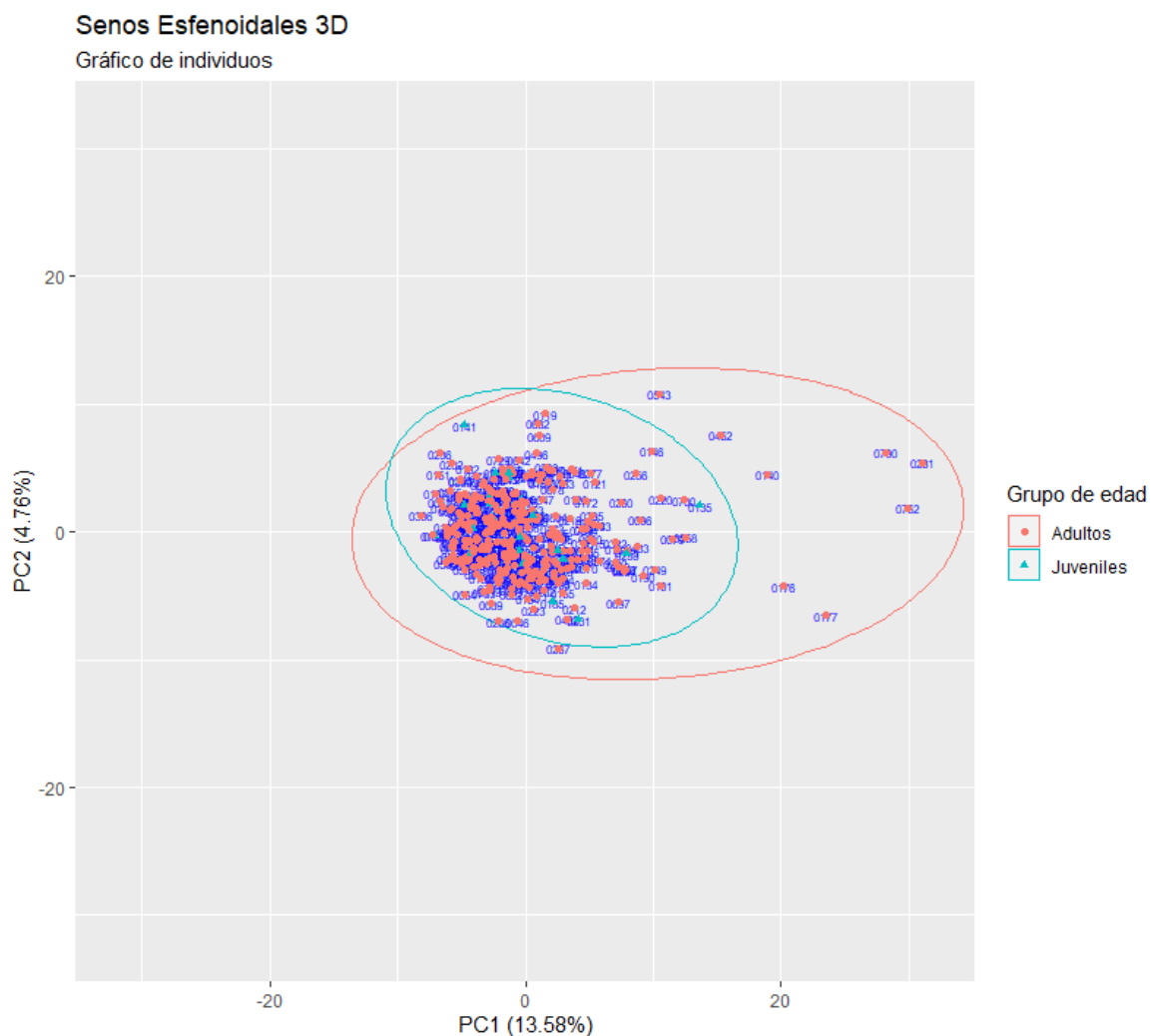


Figura 64. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC2) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. Los grupos por edad están señalados por formas y colores: círculos rosas para los individuos adultos y triángulos azules para los individuos juveniles. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de las elipses se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas para su grupo. Las elipses se dibujaron con un nivel de confianza del 95% para cada una. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

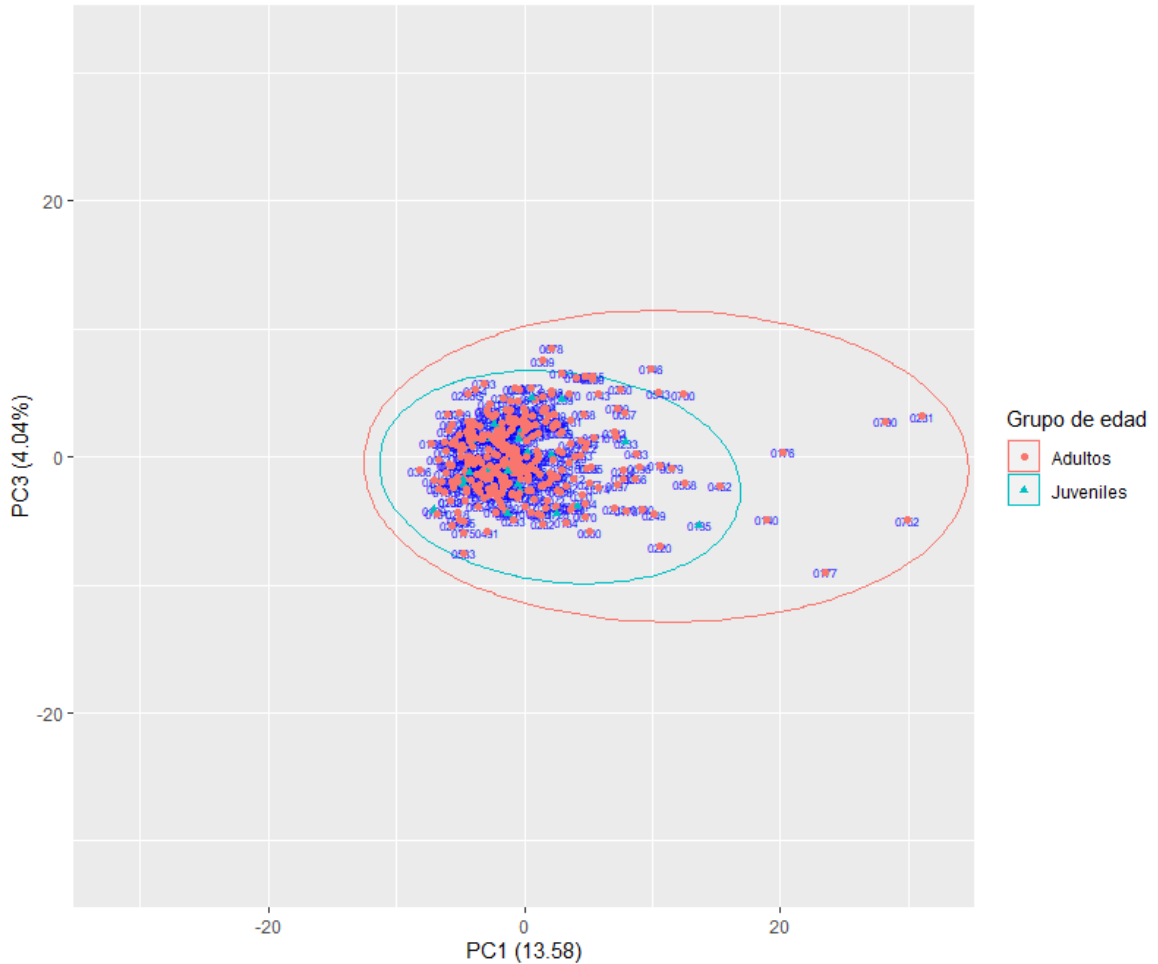


Figura 65. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC3) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. Los grupos por edad están señalados por formas y colores: círculos rosas para los individuos adultos y triángulos azules para los individuos juveniles. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de las elipses se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas para su grupo. Las elipses se dibujaron con un nivel de confianza del 95% para cada una. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

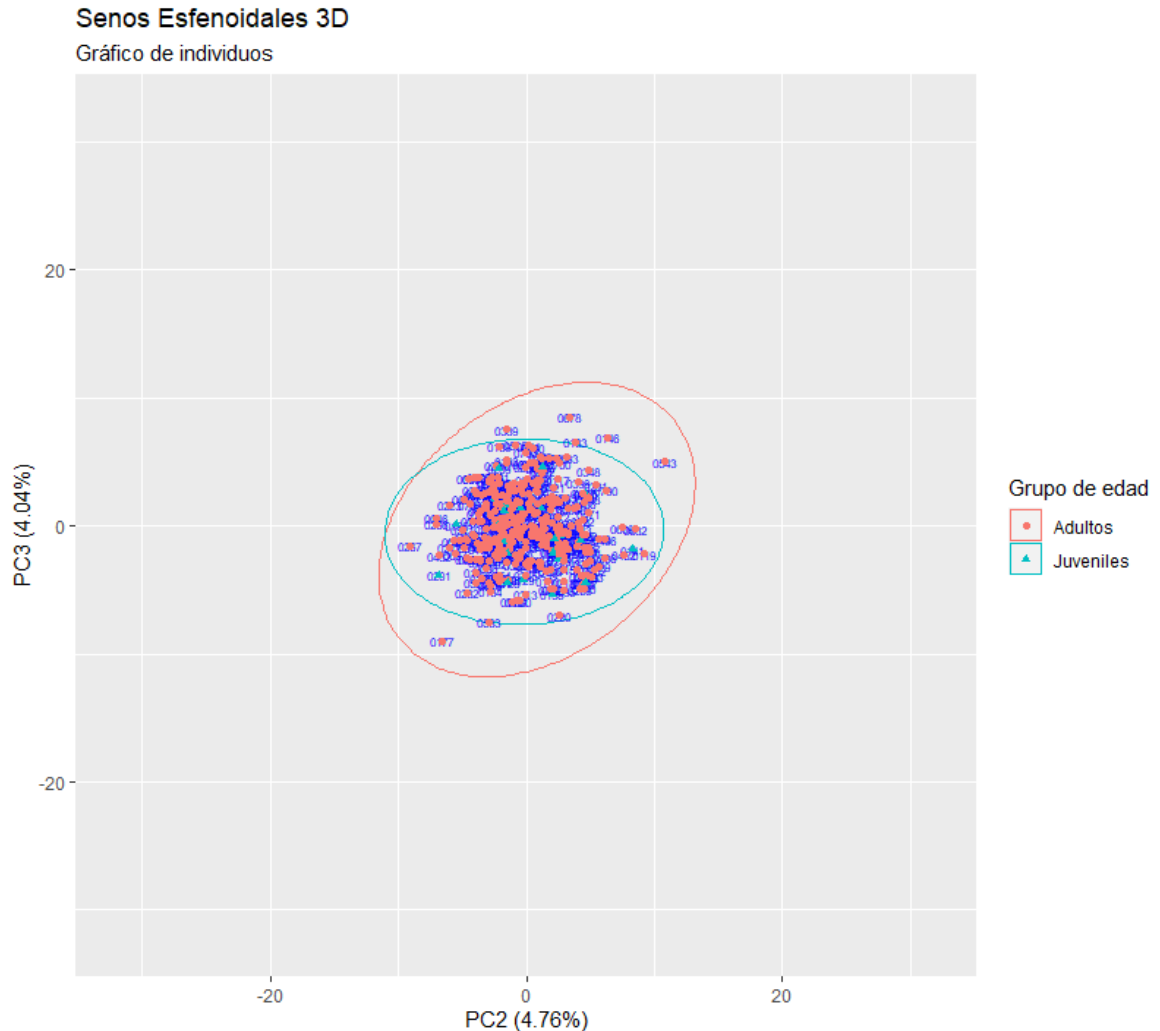


Figura 66. Gráfico del morfoespacio (PC2 y PC3) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. Los grupos por edad están señalados por formas y colores: círculos rosas para los individuos adultos y triángulos azules para los individuos juveniles. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de las elipses se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas para su grupo. Las elipses se dibujaron con un nivel de confianza del 95% para cada una. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Exploración de grupos por lateralidad

La lateralidad fue otra variable introducida en el análisis, donde la Figura 67, Figura 68 y Figura 69 exhiben la variación acumulada para los dos grupos principales de senos esfenoidales — B para senos esfenoidales bilaterales y U para senos esfenoidales unilaterales—. En este sentido, los senos bilaterales caracterizan una mayor variación en los tres primeros componentes, pero nuevamente no hay una discriminación notoria por este tipo de grupos al interior de la muestra.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

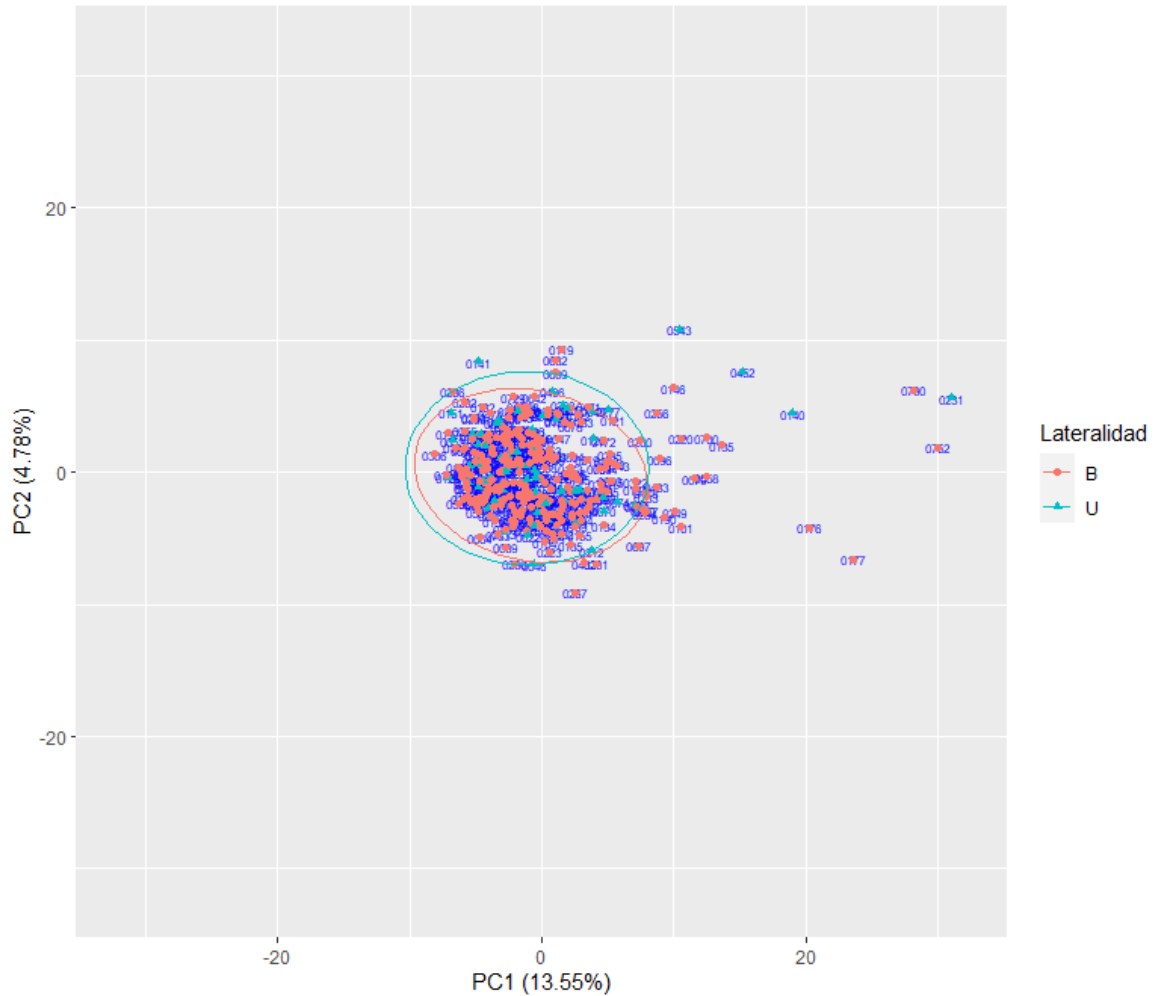


Figura 67. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC2) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. Los grupos por lateralidad están señalados por formas y colores: círculos rosas para los individuos con senos esfenoidales bilaterales (B) y triángulos azules para los individuos con senos esfenoidales unilaterales (U). En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de las elipses se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas para su grupo. Las elipses se dibujaron con un nivel de confianza del 95% para cada una. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

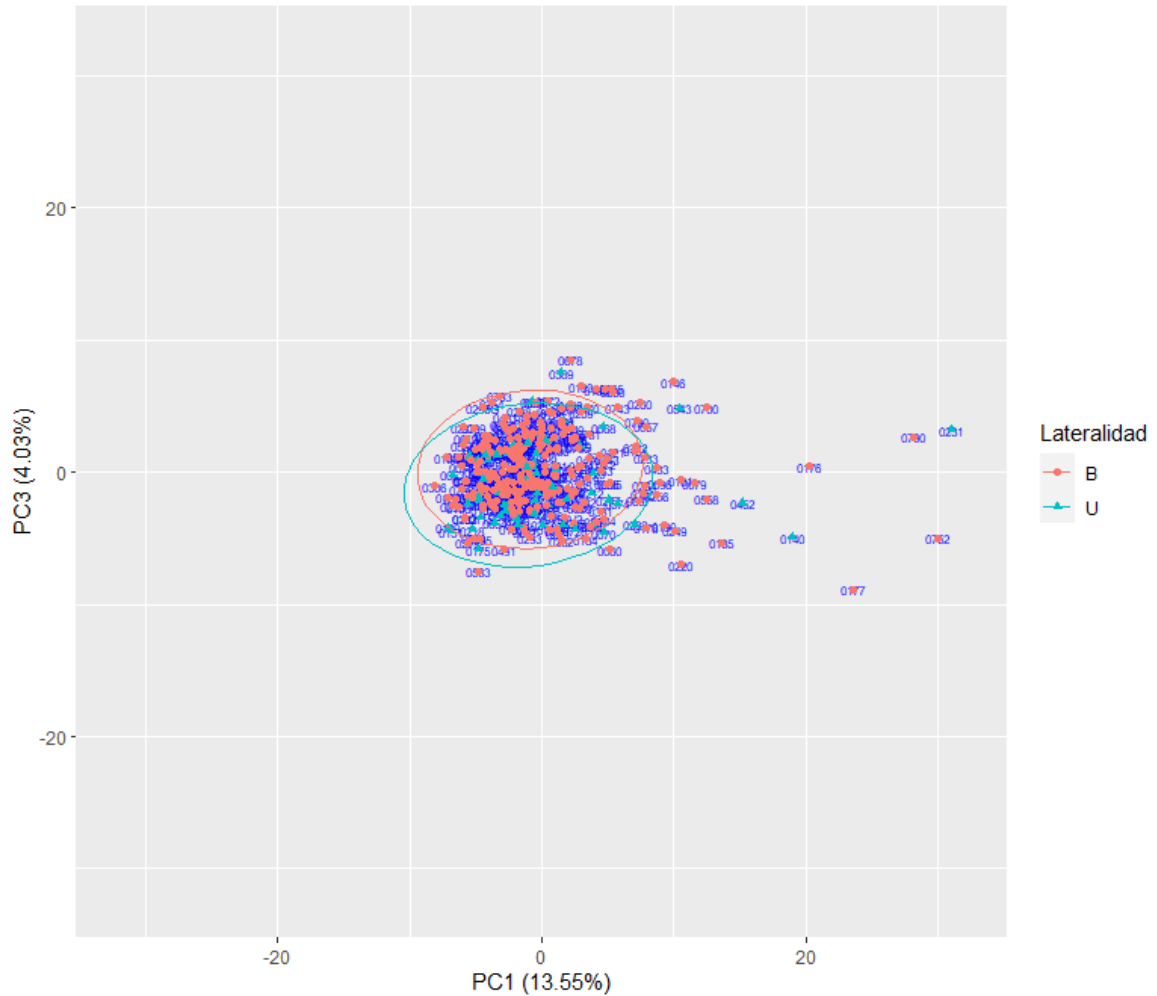


Figura 68. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC3) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. Los grupos por lateralidad están señalados por formas y colores: círculos rosas para los individuos con senos esfenoidales bilaterales (B) y triángulos azules para los individuos con senos esfenoidales unilaterales (U). En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de las elipses se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas para su grupo. Las elipses se dibujaron con un nivel de confianza del 95% para cada una. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

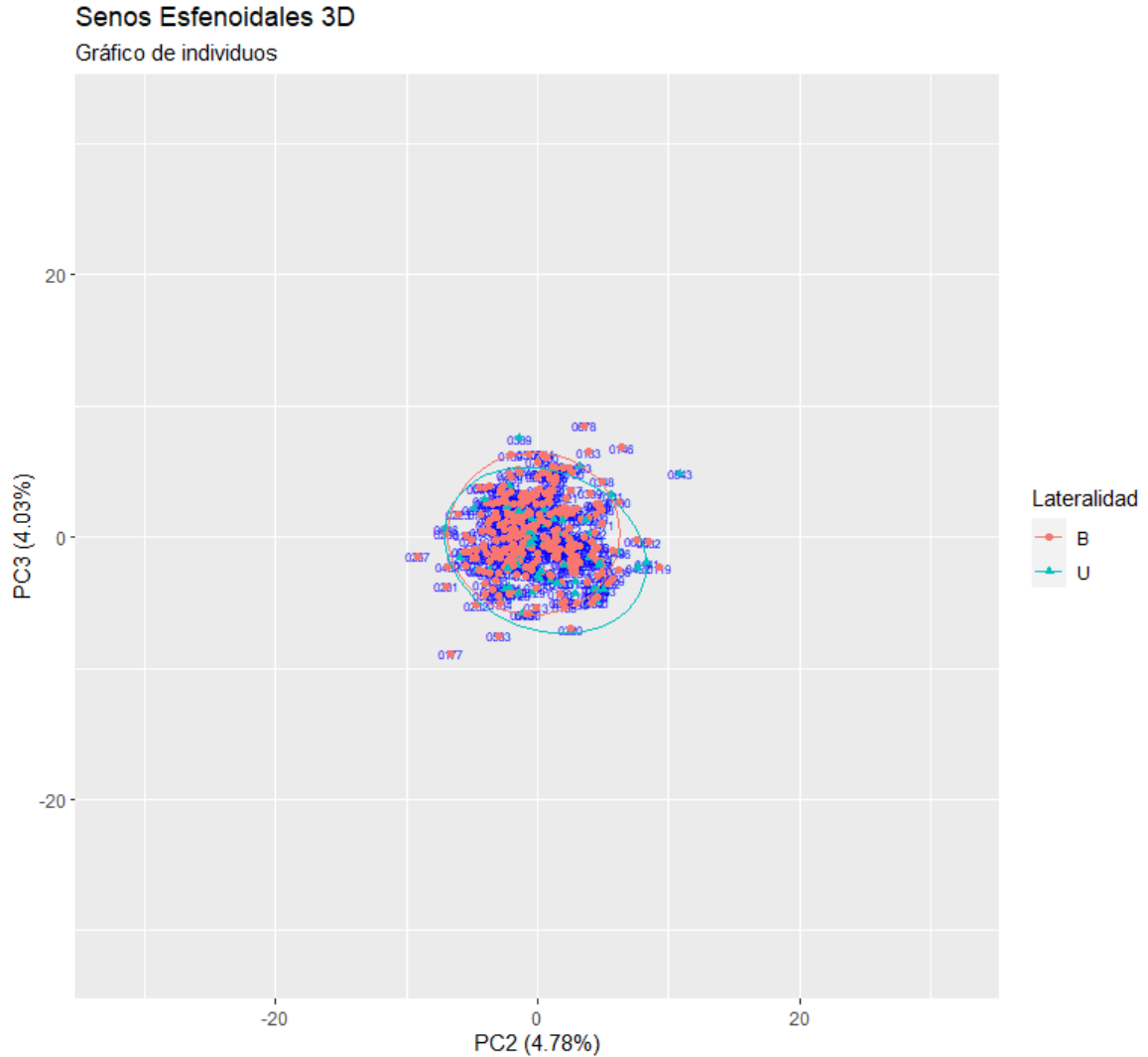


Figura 69. Gráfico del morfoespacio (PC2 y PC3) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. Los grupos por lateralidad están señalados por formas y colores: círculos rosas para los individuos con senos esfenoidales bilaterales (B) y triángulos azules para los individuos con senos esfenoidales unilaterales (U). En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de las elipses se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas para su grupo. Las elipses se dibujaron con un nivel de confianza del 95% para cada una. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Exploración de grupos por población

Dentro de los análisis exploratorios también se incluyó uno más por población (entre estados). Para ello, sólo se consideraron los individuos de los cuales se conocía el estado de procedencia ($n = 268$). Los hallazgos de la Figura 70, Figura 71 y Figura 72 demuestran la complejidad de los datos; aunque la variación por grupos en los primeros tres componentes

principales es visible, no hay una diferencia distinguible entre ellos, sino que existe una superposición en las elipses por estados.

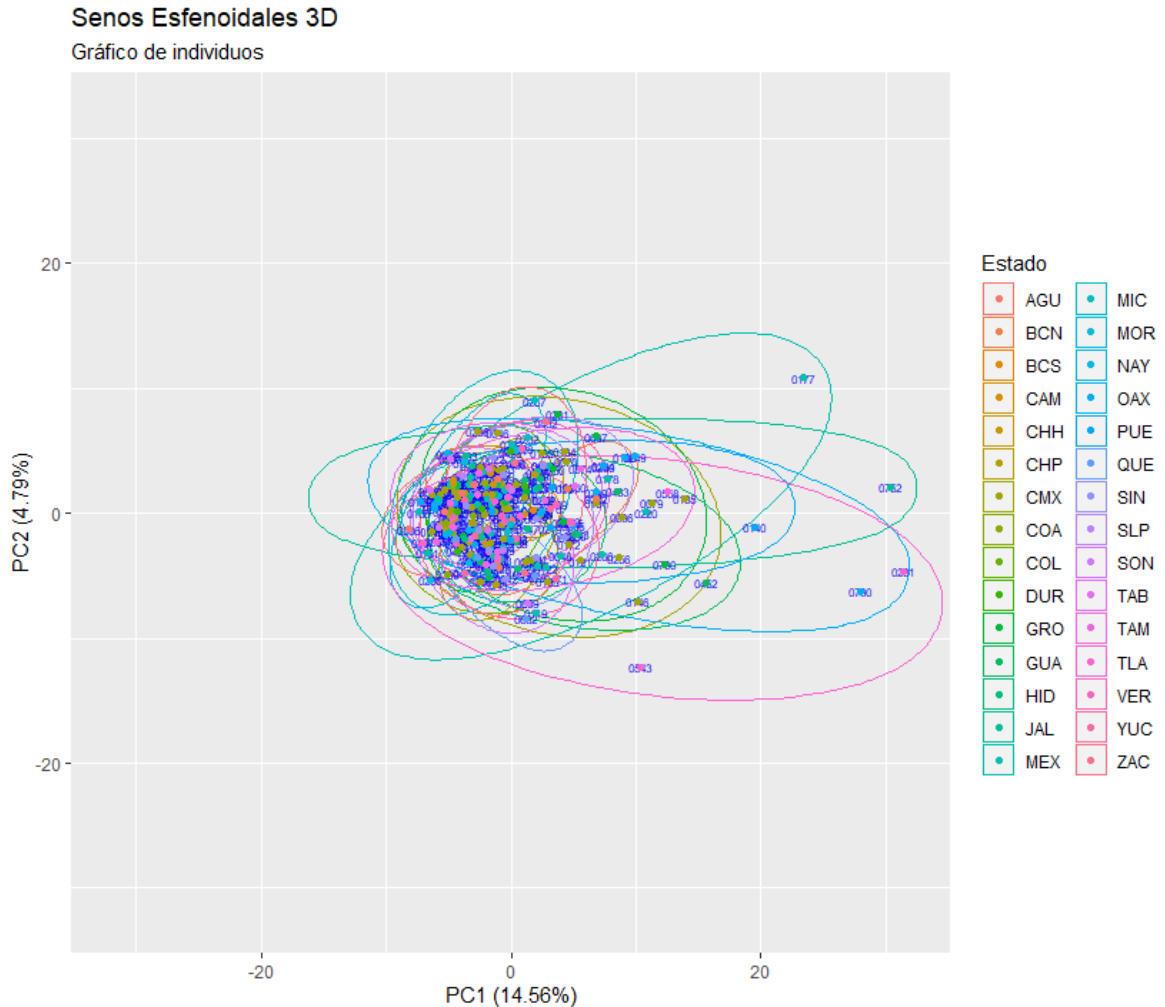


Figura 70. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC2) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. Los grupos de población por estado están señalados por formas y colores, sin embargo, la complejidad de los datos dificultó la discriminación entre ellos. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de las elipses se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas para su grupo. Las elipses se dibujaron con un nivel de confianza del 95% para cada una. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

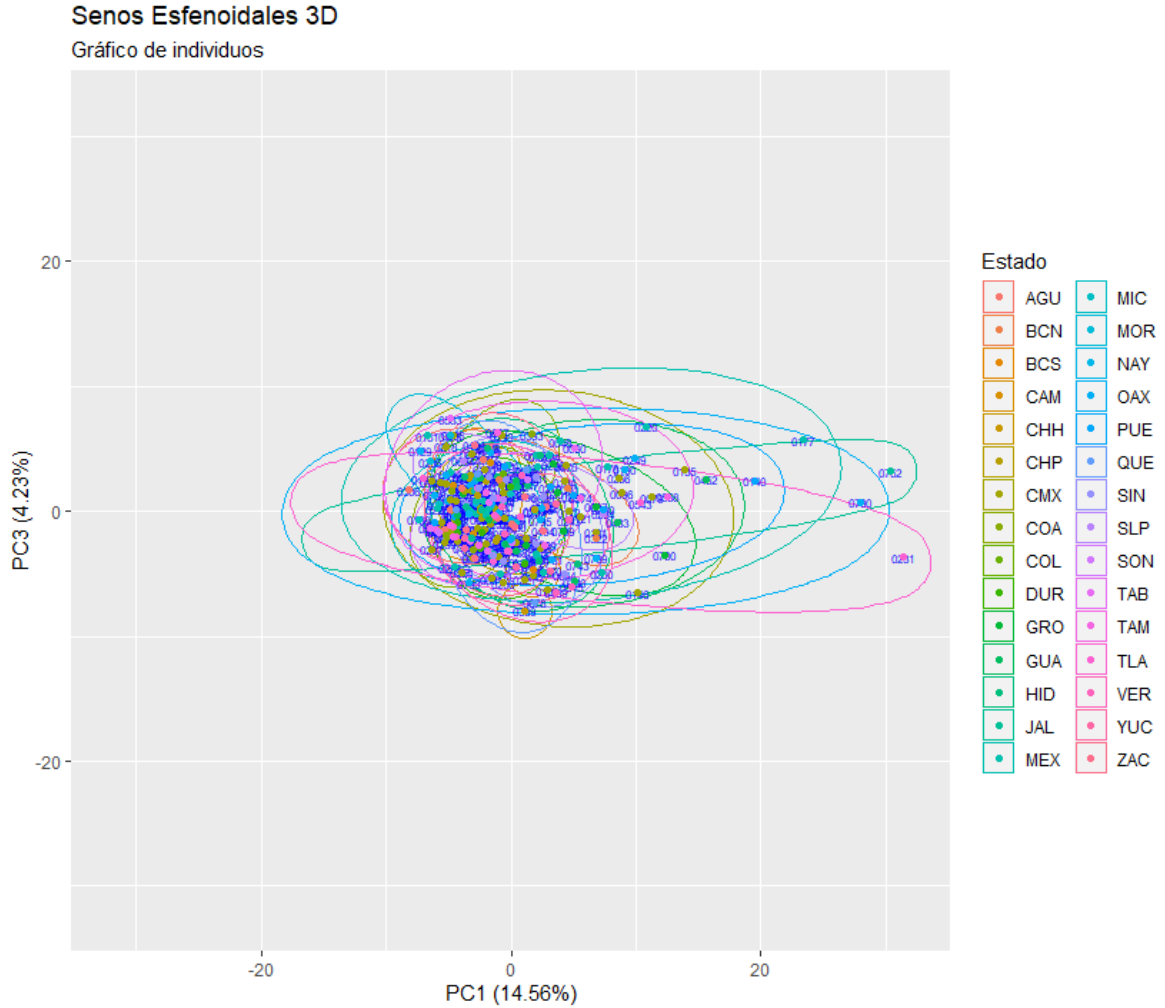


Figura 71. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC3) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. Los grupos de población por estado están señalados por formas y colores, sin embargo, la complejidad de los datos dificultó la discriminación entre ellos. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de las elipses se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas para su grupo. Las elipses se dibujaron con un nivel de confianza del 95% para cada una. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

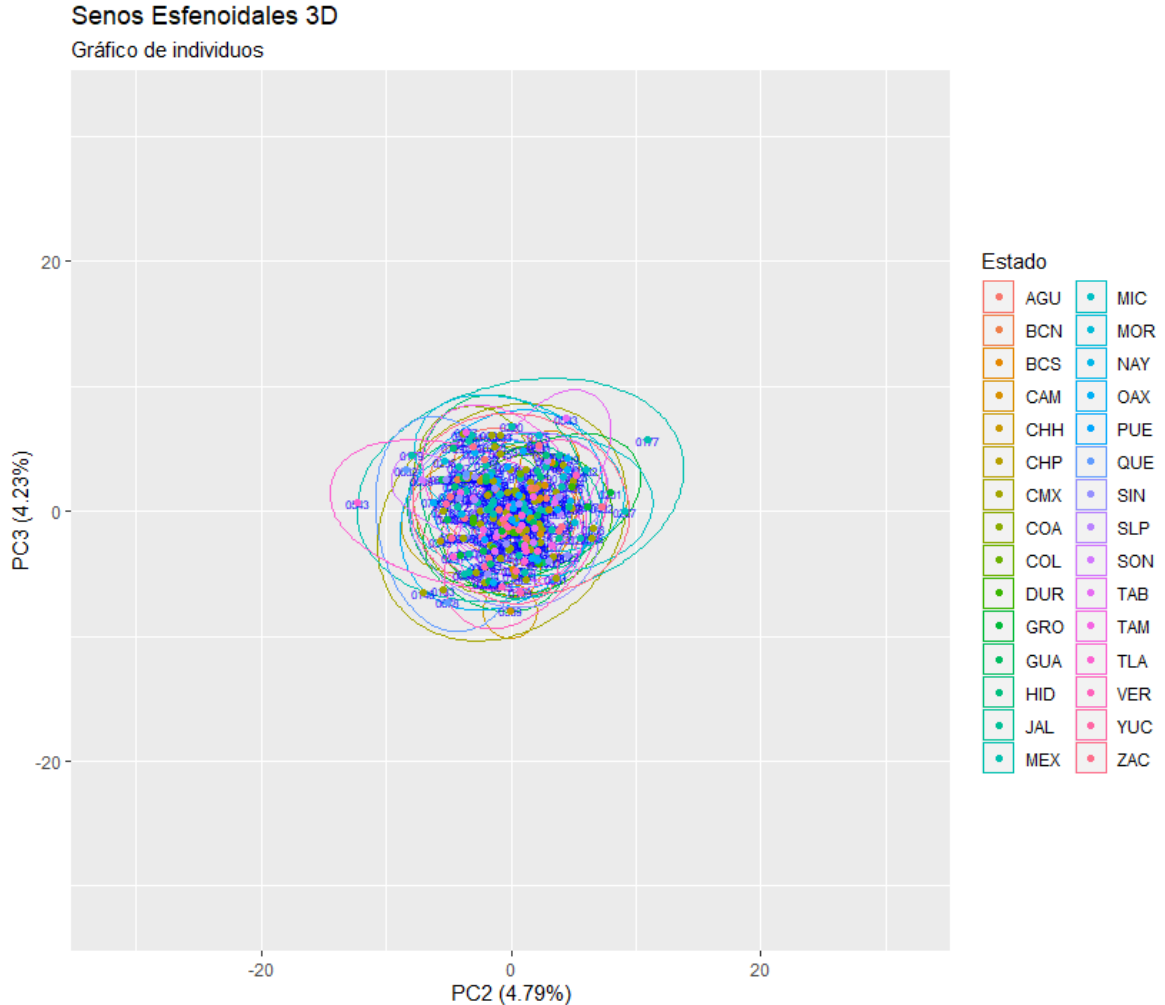


Figura 72. Gráfico del morfoespacio (PC2 y PC3) de los individuos (sin repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. Los grupos de población por estado están señalados por formas y colores, sin embargo, la complejidad de los datos dificultó la discriminación entre ellos. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de las elipses se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas para su grupo. Las elipses se dibujaron con un nivel de confianza del 95% para cada una. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Con repeticiones

Se realizó un PCA empleando 349 individuos y 31 réplicas ($n = 380$), al igual que en el análisis con repeticiones a través del método ALPACA y con el propósito de examinar la precisión en la agrupación de los individuos y las iteraciones introducidas. La varianza total de este PCA fue 205.1293, donde los primeros tres componentes principales concentraron un porcentaje de varianza de 22.05%, el 95% de la varianza recopilada desde el primer componente hasta el PC273 y menos del 1% de varianza acumulada en 29 componentes principales (0.961%).

La varianza explicada se muestra en el morfoespacio de la Figura 73, Figura 74 y Figura 75, con los individuos distribuidos en los primeros tres componentes principales, graficados con una elipse de confianza de 95%.

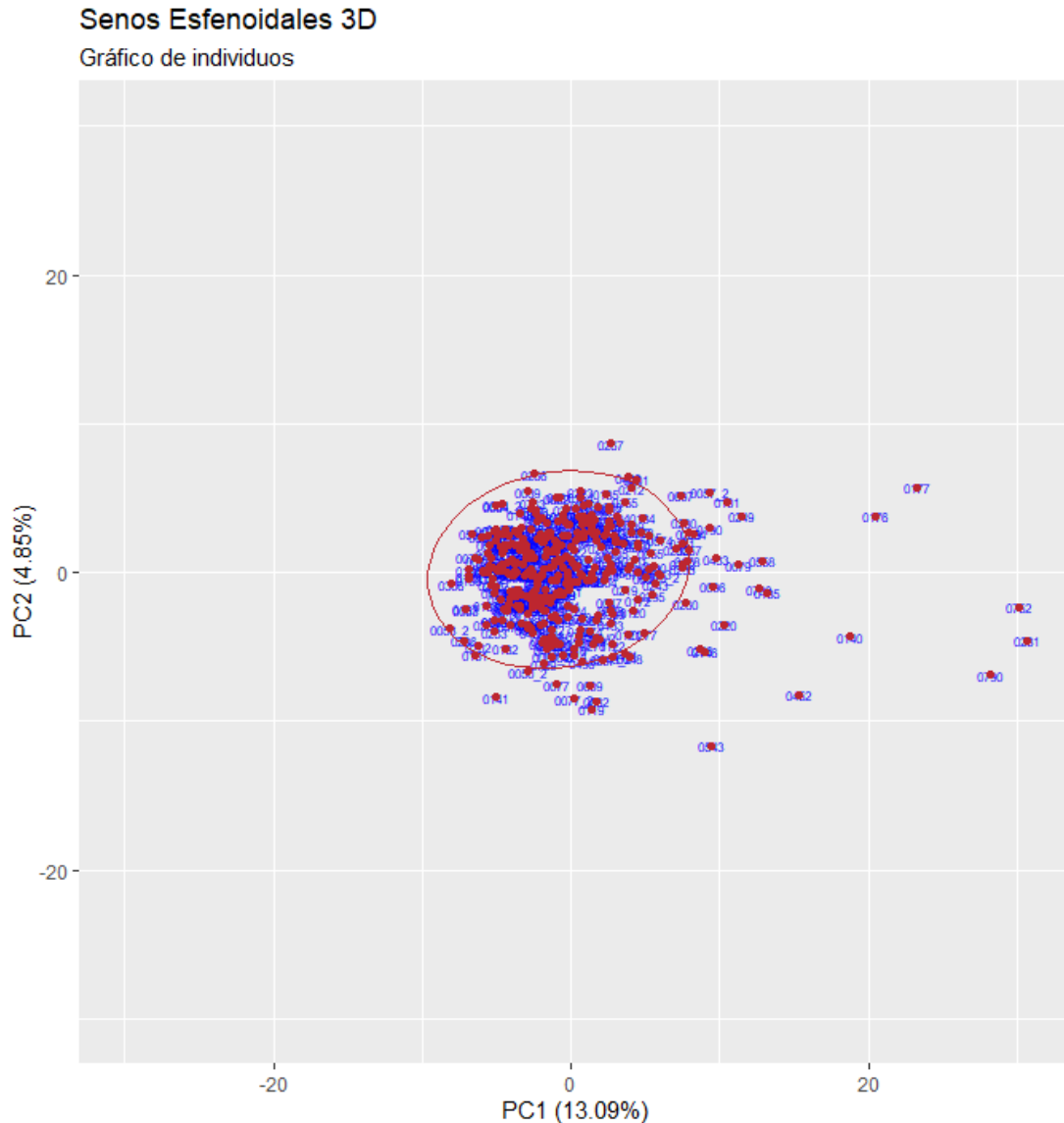


Figura 73. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC2) de los individuos (con repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

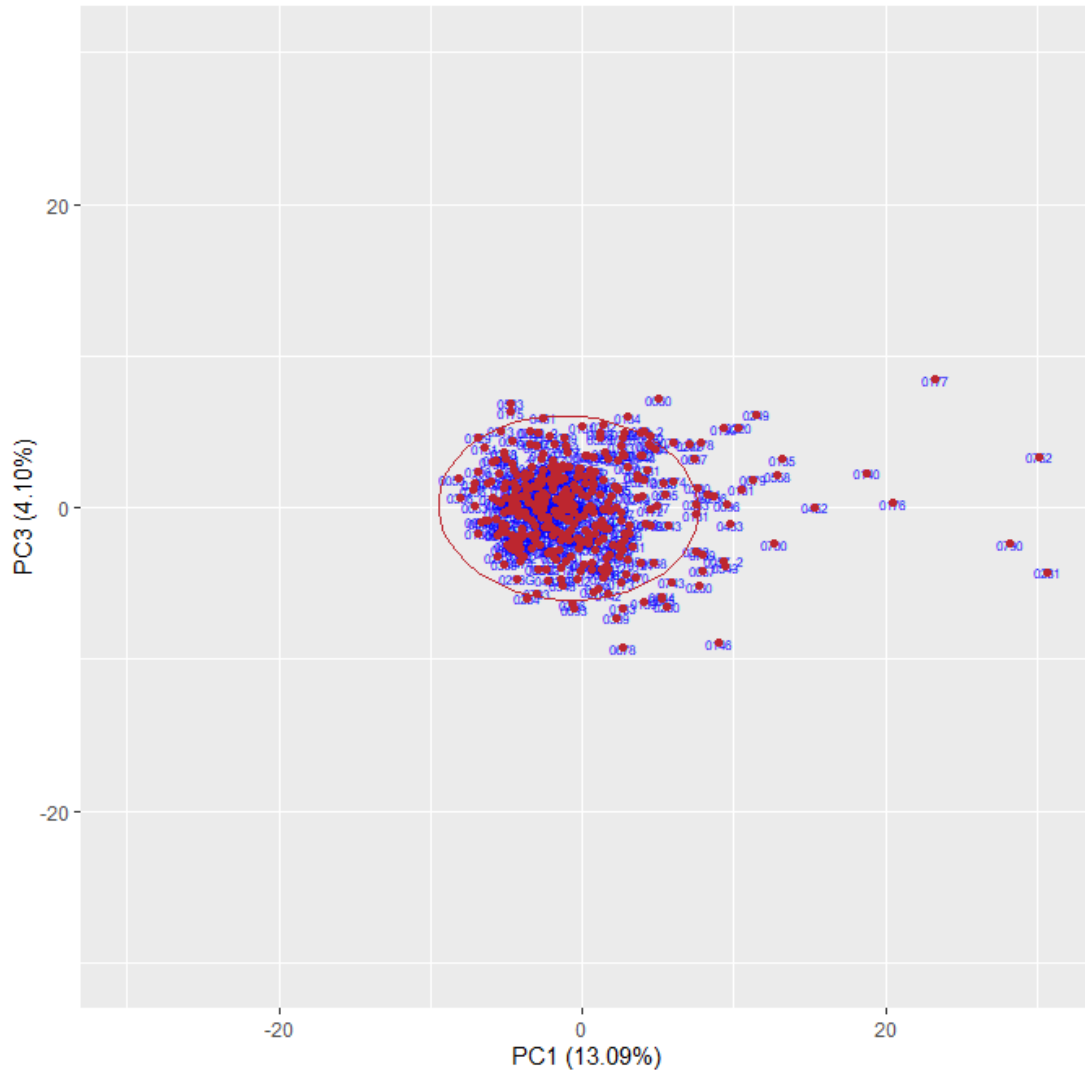


Figura 74. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC3) de los individuos (con repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

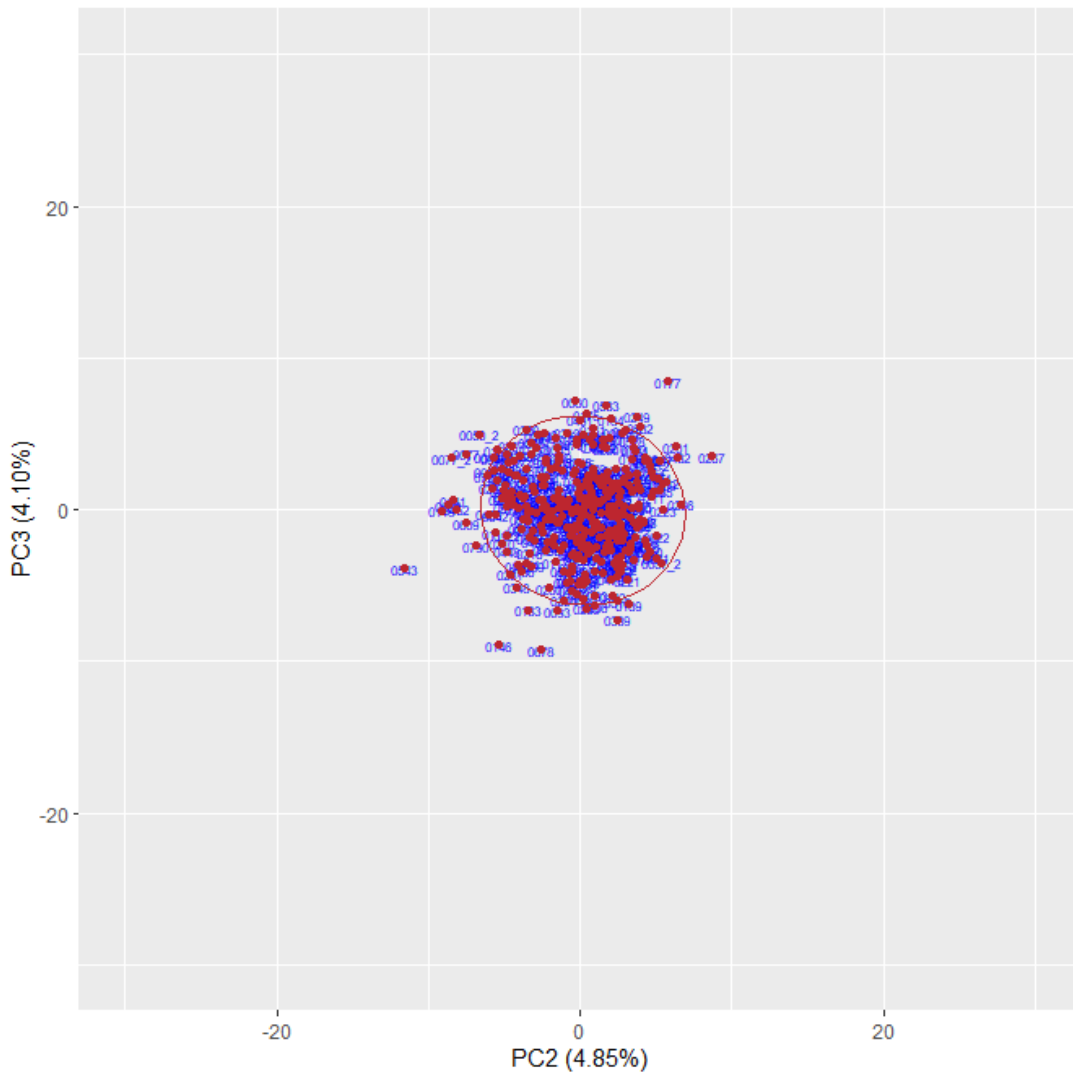


Figura 75. Gráfico del morfoespacio (PC2 y PC3) de los individuos (con repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

La variación en el morfoespacio de los tres componentes principales tiene algunas distinciones en relación con el expuesto en el PCA sin repeticiones. El extremo negativo del PC1 está definido por la réplica del individuo 0053 (0053_2), no obstante, no se encuentra alejado en biodistancia del individuo 0306; por otro lado, el extremo positivo sigue delimitado por el individuo 0231. En la segunda dimensión, los individuos clave se mantienen, 0267 y 0543, aunque el extremo que caracterizan se halla invertido, sin embargo, esta no es una diferencia relevante, puesto que los ejes de un PCA son

ortogonales, lo que significa que el signo en las coordenadas de distribución de los individuos es despreciable. Este comportamiento se repite en el tercer componente principal, a la inversa del PCA sin repeticiones, el individuo 0678 describe el cambio en la forma del eje negativo, mientras que el individuo 0177 describe el cambio morfológico del eje positivo.

Empleando la forma media como modelo de referencia

Se ejecutó un PCA en el *software RStudio* con la muestra de 349 individuos más 31 réplicas ($n = 380$), pero con las coordenadas homologadas obtenidas usando el individuo 0308 como modelo de referencia, al ser la forma más cercana a la media. Este PCA acumuló una varianza total de 92.33126, el 22.26% repartido en los primeros tres componentes principales, el 95.05% hasta el componente 271 y 30 componentes principales concentrando el 0.956% de la varianza ($< 1\%$).

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

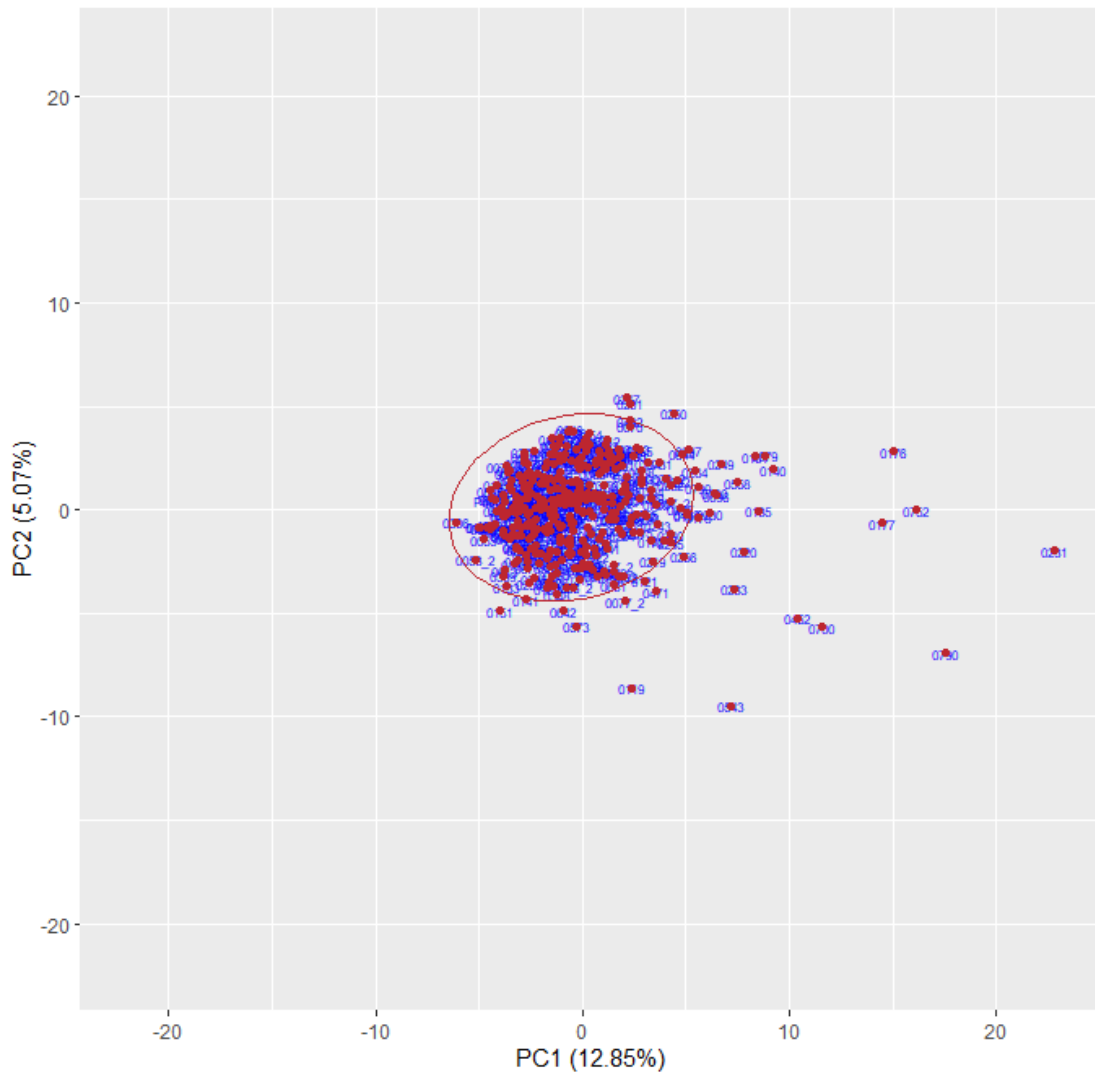


Figura 76. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC2) de los individuos (con repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA, utilizando como modelo de referencia la forma cercana a la media. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

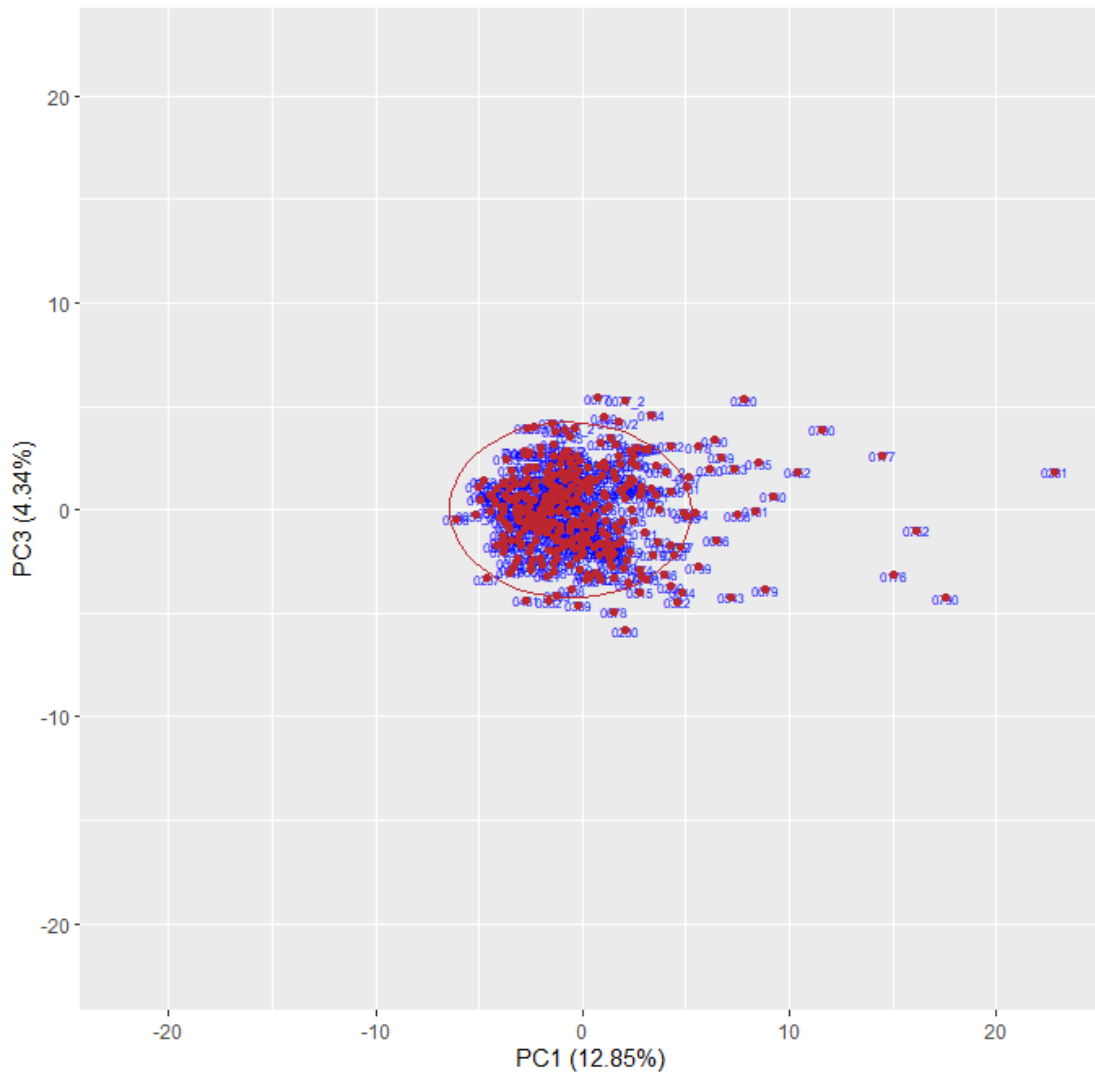


Figura 77. Gráfico del morfoespacio (PC1 y PC3) de los individuos (con repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA, utilizando como modelo de referencia la forma cercana a la media. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Senos Esfenoidales 3D

Gráfico de individuos

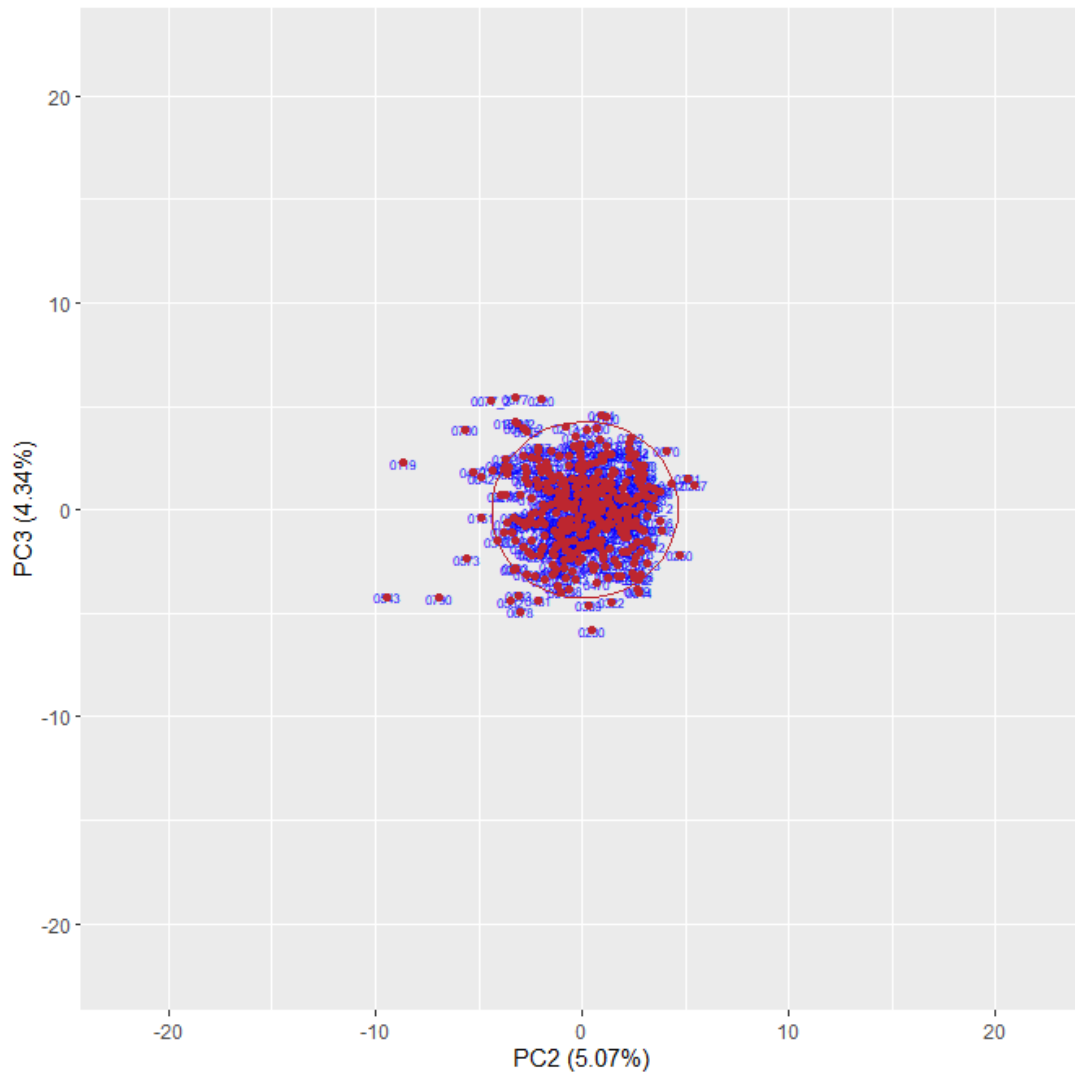


Figura 78. Gráfico del morfoespacio (PC2 y PC3) de los individuos (con repeticiones) obtenido del PCA por el método GPSA, utilizando como modelo de referencia la forma cercana a la media. En el plano se visualiza la dispersión de los puntos, donde cada uno representa una persona en la muestra. Las personas fuera de la elipse se consideran individuos que poseen senos esfenoidales con formas tridimensionales atípicas. La elipse se dibujó con un nivel de confianza del 95%. Los porcentajes entre paréntesis en el eje X y en el eje Y indican la cantidad de varianza morfológica concentrada en ellos.

Al igual que en el análisis sin repeticiones con la forma media, la variación morfológica en el eje negativo y el eje positivo de cada morfoespacio está establecida por los mismos individuos.

Análisis de conglomerados (CA)

Sin repeticiones

Con los 255 componentes principales que acumularon el 95.06% de la varianza se realizó un CA en el *software Past*, con los parámetros descritos en la metodología (algoritmo UPGMA, medida de similitud por distancia euclidiana y 10,000 permutaciones), generando un dendograma donde se contabilizaron las agrupaciones correctas, incorrectas y mimetismos presentes, teniendo como corte de referencia el valor mínimo de distancia, siendo este 5. Se obtuvo un patrón de unicidad del 100%, al no contabilizarse agrupaciones por debajo del valor establecido.

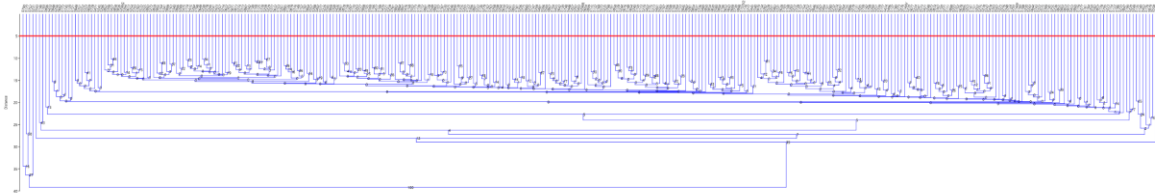


Figura 79. Clúster de los individuos sin repeticiones por el método GPSA, la línea roja se trazó en el primer nivel sobre el corte mínimo de distancia a 5. Los identificadores en la parte superior del gráfico representan a las personas, mientras los agrupamientos entre ellas están simbolizados por las líneas azules, en orden jerárquico. Para cada emparejamiento se observa un número que indica el porcentaje de similitud entre individuos, a partir de la forma tridimensional de los senos esfenoidales.

Empleando la forma media como modelo de referencia

Con los 252 componentes principales que acumularon el 95.06% de varianza se realizó un CA para estimar la precisión del método GPSA con el uso de la forma media como modelo de referencia (0308). Se ajustaron los parámetros del análisis de acuerdo con la metodología desarrollada. Una vez generado el dendograma, por examinación visual se delimitó el nivel de corte mínimo en 5, el cual fue coincidente con el valor determinado en los CAs con y sin repeticiones donde se utilizó el modelo de referencia 0073. A través de este nivel de corte se contabilizaron las agrupaciones correctas, incorrectas y mimetismos, obteniéndose un patrón de individualización del 100%.

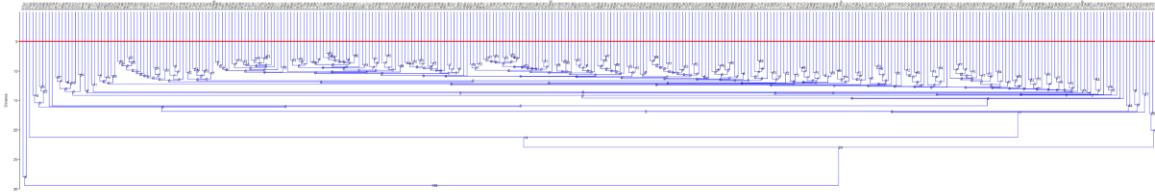


Figura 80. Clúster de los individuos sin repeticiones por el método GPSA, empleando la forma media como modelo de referencia; la línea roja se trazó en el primer nivel sobre el corte mínimo de distancia a 5. Los identificadores en la parte superior del gráfico representan a las personas, mientras los agrupamientos entre ellas están simbolizados por las líneas azules, en orden jerárquico. Para cada emparejamiento se observa un número que indica el porcentaje de similitud entre individuos, a partir de la forma tridimensional de los senos esfenoidales.

Anidación de la muestra en senos esfenoidales bilaterales

Se emplearon los 219 componentes principales que acumularon el 95.07% de la varianza para realizar un análisis de conglomerados bajo 10,000 permutaciones en el *software Past*, con la muestra de senos esfenoidales bilaterales por el método GPSA. En la Figura 81 se observa el gráfico generado en *Past*, con el nivel de corte establecido en la mínima distancia 5. El patrón de unicidad fue de 100%, al no contabilizar agrupaciones incorrectas y/o mimetismos, considerando el nivel de corte del dendograma.

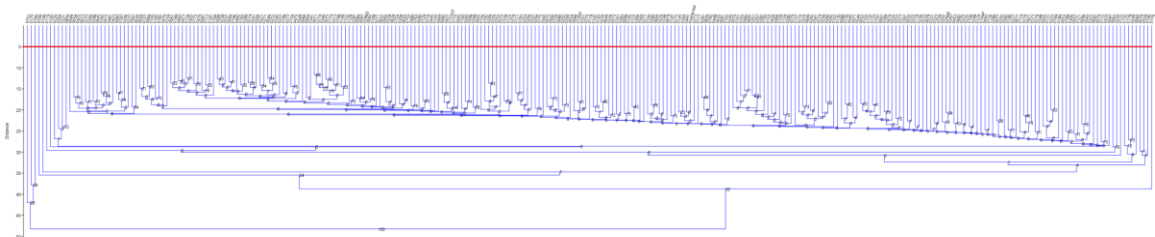


Figura 81. Clúster de los individuos anidados en senos esfenoidales bilaterales por el método GPSA; el dendograma se cortó al nivel mínimo de distancia sobre 5. Los identificadores en la parte superior del gráfico representan a las personas, mientras los agrupamientos entre ellas están simbolizados por las líneas azules, en orden jerárquico. Para cada emparejamiento se observa un número que indica el porcentaje de similitud entre individuos, a partir de la forma tridimensional de los senos esfenoidales.

Anidación de la muestra en senos esfenoidales unilaterales

Con los 47 componentes principales que acumularon el 95.46% de la varianza se desarrolló un CA para evaluar la precisión del método GPSA con la muestra de senos esfenoidales unilaterales. La Figura 82 muestra el dendograma obtenido del análisis, observándose un patrón de unicidad del 100%, al no contabilizarse agrupaciones incorrectas o mimetismos por debajo del nivel de corte estimado al 95%, bajo 10,000 permutaciones.

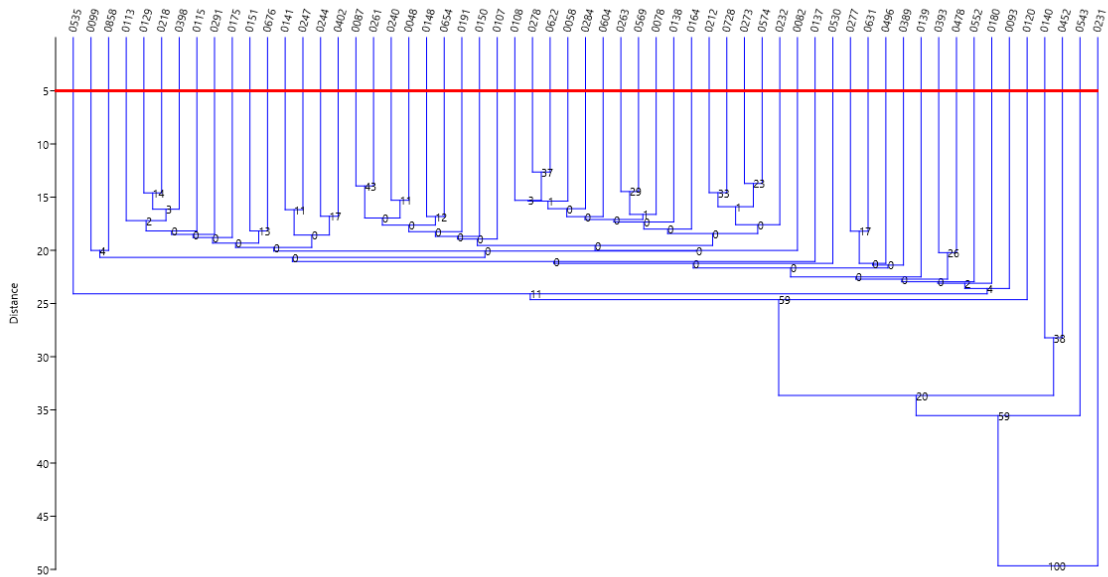


Figura 82. Clúster de los individuos anidados en senos esfenoiales unilaterales por el método GPSA; el dendograma se cortó al nivel mínimo de distancia sobre 5. Los identificadores en la parte superior del gráfico representan a las personas, mientras los agrupamientos entre ellas están simbolizados por las líneas azules, en orden jerárquico. Para cada emparejamiento se observa un número que indica el porcentaje de similitud entre individuos, a partir de la forma tridimensional de los senos esfenoiales.

Con repeticiones

Con los 273 componentes principales que concentraron el 95% de la varianza se llevó a cabo un CA en el *software Past*, con los parámetros descritos en la metodología (algoritmo UPGMA, medida de similitud por distancia euclidiana y 10,000 permutaciones para un intervalo de confianza aproximado del 95%), obteniendo un dendograma o gráfico de árbol, considerando las 31 réplicas de senos esfenoiales segmentados que se introdujeron en el análisis. Se obtuvo un porcentaje de precisión general del 74.19%, contabilizando 23 pares correctos en relación con las 31 réplicas conocidas *a priori*. De este cálculo general, 20 pares se agruparon con porcentajes mayores al 80%, mientras que los 3 pares restantes lo hicieron con porcentajes menores a dicha cifra.

Posteriormente, el dendograma exportado se cortó en el primer nivel mínimo de distancia (5), teniéndolo como referencia para determinar las agrupaciones correctas, incorrectas y mimetismos, el 22.58% (7 réplicas) quedó por debajo de dicho indicador, mientras que el 51.61% (16 réplicas) quedó por encima.

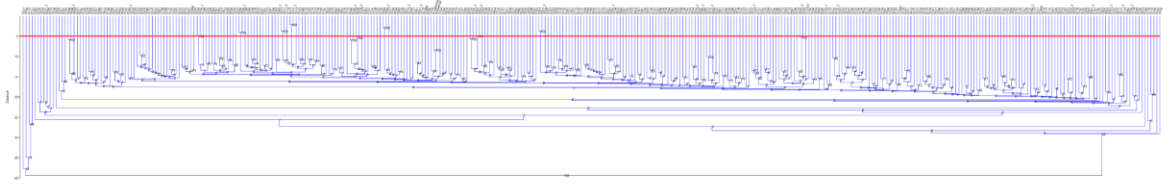


Figura 83. Clúster de los individuos con repeticiones por el método GPSA, la línea roja se trazó en el primer nivel sobre el corte mínimo de distancia a 5. Los identificadores en la parte superior del gráfico representan a las personas, mientras los agrupamientos entre ellas están simbolizados por las líneas azules, en orden jerárquico. Para cada emparejamiento se observa un número que indica el porcentaje de similitud entre individuos, a partir de la forma tridimensional de los senos esfenoideales.

Empleando la forma media como modelo de referencia

El 95.05% de la varianza se concentró hasta el componente principal 271, por lo que estos componentes se utilizaron para llevar a cabo el CA con repeticiones producto del método GPSA con la forma media. El nivel de corte del dendrograma se trazó sobre 5 como mínima distancia. Lo anterior resultó en un porcentaje general de precisión del 67.74%, donde 21 réplicas, de las 31 conocidas *a priori*, se agruparon correctamente; 11 pares por debajo del nivel de corte establecido (35.48%) y 10 pares por encima del indicador (32.25%).

De los resultados previos, 19 pares se agruparon con porcentajes mayores al 80% y 2 pares se agruparon por debajo del valor mencionado.

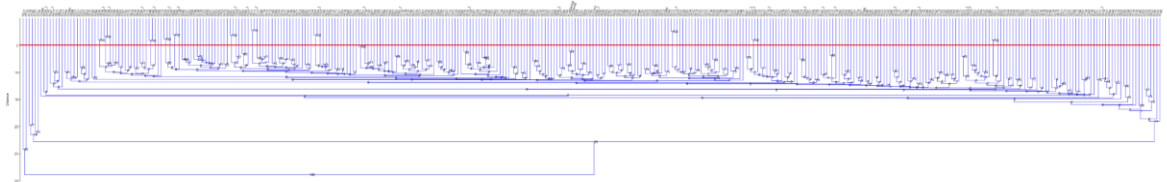


Figura 84. Clúster de los individuos con repeticiones por el método GPSA, empleando la forma media como modelo de referencia; la línea roja se trazó en el primer nivel sobre el corte mínimo de distancia a 5. Los identificadores en la parte superior del gráfico representan a las personas, mientras los agrupamientos entre ellas están simbolizados por las líneas azules, en orden jerárquico. Para cada emparejamiento se observa un número que indica el porcentaje de similitud entre individuos, a partir de la forma tridimensional de los senos esfenoideales.

Regresión múltiple multivariada

Para lidiar con las limitaciones del análisis de componentes principales, en *RStudio* se llevó a cabo una regresión múltiple multivariada general para explorar posibles correlaciones entre las variables de respuesta (la forma, introducida a través de las coordenadas homologadas obtenidas por GPSA) y las variables predictoras —edad (*Age*), lateralidad (*Lat*), sexo (*Sex*), tamaño o *centroid size* (*CSgpsa*) y volumen (*Vol*)—, así como para

evaluar las posibles diferencias estadísticamente significativas entre ellas. Tanto la lateralidad como el sexo fueron variables que se dicotomizaron para poder desarrollar el análisis. Se aplicó un número de 1,000 permutaciones para la computación de las regresiones.

La Figura 85 muestra los índices de correlación de Pearson entre las variables. La relación inversa o negativa más destacable se encuentra entre las variables sexo y volumen, mientras que la relación directa o positiva más importante se dio entre las variables tamaño y volumen; no obstante, el valor de ambos índices de correlación es muy bajo.

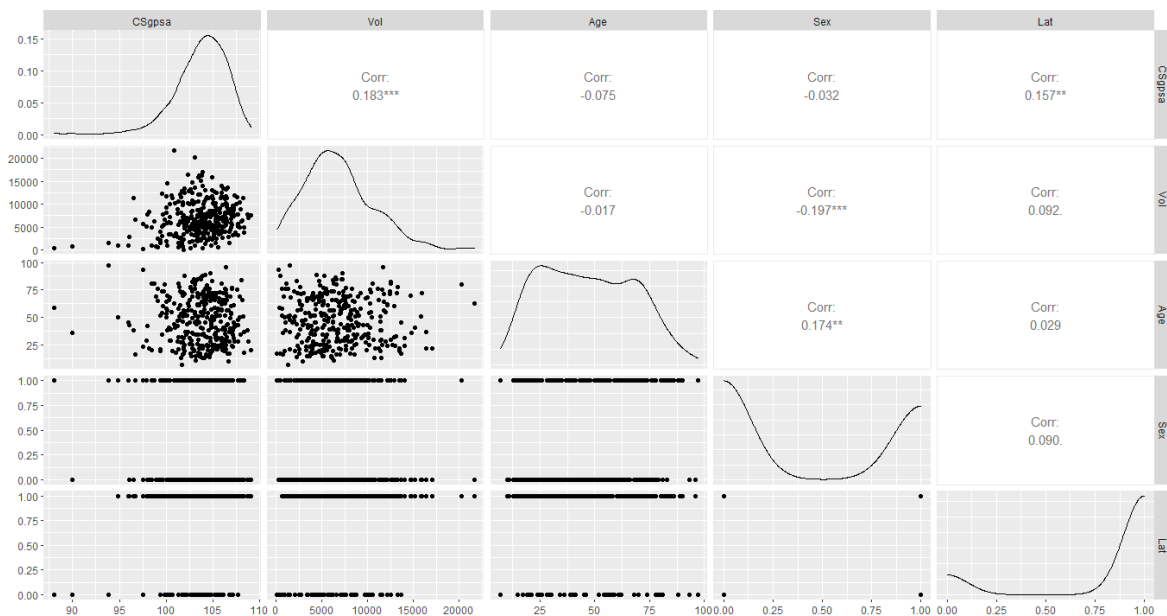


Figura 85. Gráfico que muestra la distribución y correlación de los datos entre las variables predictoras empleadas en la regresión múltiple multivariada: edad (*Age*), lateralidad (*Lat*), sexo (*Sex*), tamaño o *centroid size* (*CSgpsa*) y volumen (*Vol*).

Los resultados de la Tabla 1 a la Tabla 6 indican diferencias estadísticamente significativas para la mayoría de las variables —en relación con la forma—, exceptuando la variable del sexo, donde, asociado al estadístico *F*, se obtuvo un *p-value* mayor al nivel de significancia definido para el análisis (0.05). Este resultado fue el mismo al realizar las regresiones individuales, siendo el sexo la única variable sin diferencias significativas (*p-value* > 0.05); aunque la edad fue la segunda variable en orden con un *p-value* alto (0.021 en la regresión general y 0.047 en la regresión individual).

	Df	SS	MS	Rsq	F	Z	Pr(>F)
Edad	1	294	293.8	0.00410	1.6111	2.1012	0.021 *
Tamaño (<i>centroid size</i>)	1	7309	7309.2	0.10200	40.0741	4.8324	0.001 **
Volumen	1	1009	1008.8	0.01408	5.5311	5.1619	0.001 **
Sexo	1	225	224.8	0.00314	1.2326	1.4066	0.089 .
Lateralidad	1	628	628.4	0.00877	3.4454	4.9941	0.001 **
Residuales	341	62196	182.4	0.86792			
Total	346	71661					

Tabla 1. Resultados obtenidos de la regresión multivariada.

	Df	SS	MS	Rsq	F	Z	Pr(>F)
Edad	1	294	293.85	0.0041	1.4205	1.691	0.047 *
Residuales	345	71367	206.86	0.9959			
Total	346	71661					

Tabla 2. Resultados de la regresión individual entre la forma y la edad.

	Df	SS	MS	Rsq	F	Z	Pr(>F)
Tamaño (<i>centroid size</i>)	1	7391	7390.9	0.10314	39.674	4.9239	0.001 **
Residuales	345	64270	186.3	0.89686			
Total	346	71661					

Tabla 3. Resultados de la regresión individual entre la forma y el tamaño (*centroid size*).

	Df	SS	MS	Rsq	F	Z	Pr(>F)
Volumen	1	1415	1415.36	0.01975	6.9513	3.8057	0.001 **
Residuales	345	70246	203.61	0.98025			
Total	346	71661					

Tabla 4. Resultados de la regresión individual entre la forma y el volumen.

	Df	SS	MS	Rsq	F	Z	Pr(>F)
Sexo	1	250	249.97	0.00349	1.2076	1.0631	0.153
Residuales	345	71411	206.99	0.99651			
Total	346	71661					

Tabla 5. Resultados de la regresión individual entre la forma y el sexo.

	Df	SS	MS	Rsq	F	Z	Pr(>F)
Lateralidad	1	590	589.83	0.00823	2.8632	2.933	0.001 **
Residuales	345	71071	206.00	0.99177			
Total	346	71661					

Tabla 6. Resultados de la regresión individual entre la forma y la lateralidad.

Estadístico de Procrustes (PROTEST)

Se llevó a cabo un estadístico de Procrustes en el *software RStudio*, con el propósito de analizar la proporcionalidad de las matrices conformadas por los *PC scores* de los PCAs realizados por el método GPSA y ALPACA sin iteraciones. Se tomaron los primeros cuatro componentes principales, los cuales acumulaban una cantidad de varianza similar. Se obtuvo una correlación de 0.2 y una significancia de 0.000999, demostrando que no existe proporcionalidad entre ambos conjuntos de datos, también debido a la gran diferencia en la dimensionalidad de las variables de forma.

Capítulo V. Discusión

Según, pero no debe uno inquietarse mucho por esto, porque cuando faltan ideas, hay palabras que pueden sustituirlas; con ellas puede discutirse con energía y hasta con ellas erigir un sistema.

—J. W. Goethe, Fausto

Los senos esfenoidales demostraron ser un fenotipo útil para la identificación personal. Para sumar el 95% de la varianza se necesitaron menos de 100 componentes principales por el método ALPACA y cerca del doble (más de 200 componentes principales) por el método GPSA —salvo para el análisis donde se anidó la muestra en senos esfenoidales unilaterales, en este caso se requirieron 47 componentes principales—. La diferencia entre métodos se debe a la cantidad de información introducida, ya que por el método ALPACA se utilizaron 130 *pseudolandmarks*, de acuerdo con el criterio de la curva de evaluación de muestreo de *landmarks* (LaSEC). Por otro lado, GPSA emplea las coordenadas homologadas a partir del número de vértices del modelo de referencia seleccionado, por lo que la cantidad de información es mayor y más fidedigna a la estructura original, necesitando más componentes para explicar toda la variación morfológica. Esto justifica la eficiencia de GPSA por encima de ALPACA, puesto que captura una topología más completa de la superficie de un modelo 3D y, por consiguiente, el método es más sensible a encontrar una coincidencia dentro de una base o muestra de modelos indubitados. Además, aunque la curva LaSEC arroje un resultado con cierto porcentaje de ajuste, una de sus debilidades es que no permite determinar el lugar donde se deben colocar los *landmarks* —no obstante, en sus resultados es posible evaluar de manera independiente el grado de confianza de ajuste de cada *landmark*—. Watanabe (2018) se pronuncia al respecto de estos argumentos, estableciendo que añadir *landmarks* en 3D ofrece distintas ventajas, ya que dota de fidelidad, añade consistencia estadística y mejora la eficiencia de la caracterización de la variación de la forma en sistemas biológicos, beneficiando su visualización; sin embargo, es importante tener en cuenta las propiedades únicas de la estructura en análisis, así como su naturaleza intrapoblacional. Por el contrario, también hace una crítica hacia la posibilidad de malinterpretar las diferencias morfológicas locales y conducir las a diferencias globales entre especímenes —produciendo resultados espurios—, o bien, menciona que sobremuestrear el número de *landmarks* podría afectar la utilización de pruebas estadísticas, si la cantidad de variables de forma excede el número de especímenes.

En el caso de los senos esfenoidales, el uso de *landmarks* críticos se encuentra limitado, debido a la falta de homología anatómica de la estructura, esto fue lo que dio paso a la decisión de emplear *pseudolandmarks* o *landmarks* de superficie que se acoplaran a la naturaleza tridimensional de los modelos. Considerando que el número de *landmarks* podía tender a infinito, la curva LaSEC resultó ser una herramienta útil para determinar teóricamente una cantidad consistente y suficiente de puntos para caracterizar la forma del fenotipo.

Es cierto que la proyección y la distribución de los *pseudolandmarks* mediante el método ALPACA es otro tópico en el cual se debe profundizar, ya que esto explica el bajo porcentaje de agrupación en el análisis con réplicas. En parte, esto se aborda desde la segmentación de las tomografías, siendo necesaria la práctica y capacitación constante, sobre todo en el reconocimiento anatómico de los senos esfenoidales en sus diferentes vistas, debido a que varios de los inconvenientes surgen de la dificultad para localizar las delimitaciones del fenotipo con estructuras adyacentes, en especial para definir la terminación del *septum* interesfenoidal, por ejemplo, en la primera iteración de la segmentación se encontraron senos que parecían bilaterales (dos hemisenos izquierdo y derecho separados por un *septum* interesfenoidal), pero en una segunda iteración, se observó que esos mismos hemisenos se hallaban unidos por una pequeña porción de pneumatización que el *septum* no había podido dividir. Estas diferencias están relacionadas con varios factores, que van desde las propiedades de la tomografía, como la manera en que fue capturada, la resolución de esta respecto a las estructuras endocraneales, la distinción de los límites de inicio y final de la pneumatización de los senos esfenoidales —puesto que se hallan en intercomunicación con los demás senos paranasales y no siempre es sencillo detectar sus fronteras con estructuras adyacentes—, hasta las características propias que presenta cada individuo, como el patrón de extensión neumático, el tamaño y el desarrollo.

A estas cuestiones es importante sumar el hecho de que al estandarizar un número de *landmarks* fijo para todos los modelos, este número debe adaptarse a la morfología de cada uno de ellos, un aspecto que va en relación con el principio de cobertura y que, al momento de proyectar los *pseudolandmarks*, puede generar vacíos sin llenar en la superficie de los modelos. Este fenómeno ocasiona que los *landmarks* se acumulen más en

regiones con densa cantidad de vértices o mucha información —como pueden ser valles, surcos o irregularidades topológicas—; también hay que añadir que, en el caso de los senos bilaterales, esos *landmarks* se deben distribuir homogéneamente en ambos hemisenos, lo que suele generar distribuciones dependientes del espacio generado por el *septum* interesfenoidal que ocasiona la bilateralidad. Entre los enfoques metodológicos que se recomiendan aplicar para solventar este inconveniente, se encuentra el descrito por Landi & O’Higgins (2019), quienes resolvieron emplear el hemiseno derecho de sus modelos, no obstante, su estudio se fundó en el uso de los senos maxilares, no esfenoidales.

Retomando estas ideas, Cardini (2017) se pronuncia sobre la cuestión práctica de emplear uno o ambos lados de una estructura para el análisis de simetría (en particular aquellas que son bilaterales). En dicho estudio, argumenta que los *landmarks* que se hallen alrededor del plano medio acumularán un componente de variación mayor en una configuración de *landmarks* unilateral que en una configuración de *landmarks* bilateral; además, la asimetría es otro factor que influye en las diferencias entre utilizar uno o ambos lados, debido a que una configuración de *landmarks* unilateral registra pequeñas asimetrías en el plano medio, pero no captura las asimetrías que se encuentran en *landmarks* pareados —en contraparte, las asimetrías comúnmente se descartan en análisis que usan ambos lados de la estructura, cuando no se busca estimar diferencias entre ellos—. La autora concluye aconsejando que, a menos que la asimetría sea considerable, siempre que se realicen estudios unilaterales se debe reconstruir primero el lado faltante (por ejemplo, aplicando reflexión especular), y después se lleven a cabo los análisis con los datos bilaterales; o bien, otra aproximación es simplemente utilizar ambos lados. En la presente investigación se observó que los senos esfenoidales bilaterales no seguían patrones de simetría en sus hemisenos, premisa sobre la cual se decidió disponer de la totalidad de la estructura y emplear las porciones izquierda y derecha para los análisis, con el propósito de capturar con mayor precisión la variación morfológica e incrementar la sensibilidad para detectar una mayor cantidad de diferencias fenotípicas al realizar la caracterización (Cardini, 2017; Collyer *et al.*, 2015).

Para analizar de manera más específica el comportamiento de los datos, se utilizaron dos conjuntos muestrales: 1) uno constituido por senos esfenoidales bilaterales y 2) uno constituido por senos esfenoidales unilaterales, dado que un aspecto destacable del

razonamiento de Cardini (2017) implica que el componente asimétrico de la forma es parte de la varianza del análisis generalizado de Procrustes original y podría contribuir en el alineamiento de los individuos en la muestra. Los resultados obtenidos a través del PCA fueron consistentes en cuanto a la configuración del morfoespacio tanto en la muestra bilateral como en la unilateral. Es notable resaltar que tres individuos de los extremos negativo y positivo en los primeros dos componentes del PCA sin repeticiones se mantuvieron constantes también en los primeros dos componentes de la anidación bilateral y la anidación unilateral; es decir, los individuos extremos del PC1-, PC1+ y PC2+ de la muestra sin repeticiones coincidieron con los individuos extremos del PC1- (anidación bilateral), PC1- (anidación unilateral) y PC2+ (anidación unilateral), respectivamente. El hecho de que estos tres individuos referidos siempre se mantengan en los extremos del morfoespacio sugiere que la lateralidad y la división de los hemisenos explica la mayor variación de la forma en las primeras dimensiones del PCA, aunque concediendo un vistazo a la exploración de grupos por lateralidad, no es suficiente para separar la muestra en individuos con senos esfenoidales bilaterales e individuos con senos esfenoidales unilaterales (incluso valorando que, visualmente, los senos esfenoidales bilaterales generan una mayor deformación en las elipses de confianza a lo largo de los tres primeros componentes). Lo anterior ofrece soporte a las conclusiones inferidas por Cardini (2017): puesto que la asimetría de los senos esfenoidales es grande y la variación se amplía cuando existe bilateralidad, se recomienda el uso de ambos lados del fenotipo (los hemisenos izquierdo y derecho). No obstante, se requieren más análisis profundos en esta área para constatar estas suposiciones, como el estudio hecho por Landi & O'Higgins (2019) —citado líneas más arriba— que utiliza sólo un lado de la estructura y no considera la asimetría presente en los senos maxilares. Como ya se vio, este enfoque no sería el más apropiado —sin excluir el factor de que los autores emplearon un número de seis *landmarks* (cinco de tipo II y uno de tipo I, sin *landmarks* de superficie) en un fenotipo de naturaleza tridimensional—.

A diferencia de lo que algunos estudios sugieren para ciertos conjuntos de datos fenotípicos, como el publicado por Cardini (2016), la información tridimensional distribuida en ambos lados de los senos esfenoidales no es redundante y existe evidencia de diferencias por asimetría direccional, por lo que no se recomienda excluir alguno de los

hemisenos (si están presentes), debido al alto valor biológico de sus datos morfológicos e individualizantes. En algunos casos, los senos bilaterales mostraron coincidencias en el desarrollo de sus patrones de pneumatización; por ejemplo, al analizar el tercer componente obtenido por medio del método GPSA —cuyos hallazgos se explicarán más adelante—, se observó que tanto el hemiseno izquierdo como el derecho se extendían hasta los procesos pterigoideos, considerándose como indicios de asimetría fluctuante, sin embargo, hacen falta investigaciones más concisas en torno a estas relaciones de similitud entre senos esfenoidales bilaterales.

En cuanto al análisis de la forma, existen pocos estudios concernientes al respecto para el contexto forense, la mayoría tratándose de aproximaciones tipológicas o clasificatorias de carácter morfoscóptico desde un enfoque médico-quirúrgico. Sin embargo, un trabajo exhaustivo sobre el tema fue realizado por Singh *et al.* (2021), donde se evaluaron las siguientes cinco características morfológicas principales en los senos esfenoidales: 1) simetría, 2) configuración, 3) extensión, 4) forma y 5) septación. La cuarta clase fue analizada con base en la forma del modelo tridimensional reconstruido en vista coronal, estableciéndose dos categorías: 1) seno bien definido y 2) seno amorfo, y cuatro subcategorías: 1) esférico, 2) pentagonal, 3) cuadrilateral y 4) triangular; la forma cuadrilateral y la forma pentagonal fueron las formas más y menos frecuentes, respectivamente, sugiriendo que la forma es un indicativo del cómo progresa la extensión de la pneumatización en estructuras óseas adyacentes, además de reportar que la forma es independiente de la edad, el sexo, las condiciones intrínsecas del seno e inconsistente con la bilateralidad (concluyendo que no existe diferencia morfológica significativa entre hemisenos). Finalmente, los mismos autores reconocen que su clasificación morfológica se halla graduada de manera subjetiva, en respuesta a la falta de estándares.

En particular, México carece de estudios de carácter cuantitativo reportados en relación con la forma de los senos esfenoidales, aunque Treviño-Gonzalez *et al.* (2021) presentan una investigación concerniente a la intervención quirúrgica endoscópica de senos, donde describen patrones de pneumatización y variantes anatómicas; en dicho trabajo, los autores mencionan las frecuencias porcentuales de varias características morfológicas estudiadas en otras poblaciones, pero no se remiten a una captura propia de la morfología. También reportan que el *septum* interesfenoidal podría no ser un indicador

confiable de su aproximación a la línea media del seno —de lo cual se infiere un efecto de asimetría en la ontogenia de los senos esfenoidales—. Finalmente, los autores vuelven a enfatizar el enfoque morfoscópico, al concluir con la necesidad de desarrollar descripciones precisas para las distintas variantes anatómicas entre poblaciones.

A pesar de que gran parte de esta literatura basa sus estudios en métodos de extracción de características morfoscópicas, o bien, en la comparación y/o superposición uno a uno de modelos en 3D, este proyecto de investigación hace aportaciones para aprovechar la utilización de grandes bases de datos, reducir el tamaño de universos muestrales —por ejemplo, en la identificación de víctimas de desastres en masa— y disminuir el tiempo que llevaría realizar las comparaciones uno a uno. Los hallazgos de este trabajo priorizan la aplicación de técnicas de estadística multivariada para llevar a cabo la caracterización morfológica de los senos esfenoidales. En la línea del método ALPACA, el PCA resume en el primer componente la covariación asociada a la bilateralidad, en el segundo componente se hace referencia a la separación de los hemisenos en senos esfenoidales bilaterales, y el tercer componente describe la diferencia dimensional entre hemisenos y, así mismo, muestra un patrón de pneumatización que se extiende hacia los procesos pterigoideos. Por el método GPSA, se mantienen las variaciones observadas en el primer componente (bilateralidad), el tercer componente también mantiene su carácter (dimensionalidad de los hemisenos y patrón de extensión hacia los procesos pterigoideos), pero añade a este componente una variación en la separación de los hemisenos. Por tanto, el único componente que modifica sus características notablemente —entre el método ALPACA y GPSA— es el segundo, ya que resume la variación por bilateralidad en conjunto con el primer componente y explica el patrón de pneumatización de los senos en sentido sagital. Ahora bien, se considera que el método que mejor explica la variación de los senos esfenoidales es el GPSA, debido a que aporta más información morfológica al análisis de componentes principales, a diferencia del método ALPACA, que, como se ha discutido en esta sección, implica el uso de una limitada y menor cantidad de *landmarks*, los cuales, por cumplir el principio de cobertura, deben adaptarse por completo a la compleja forma tridimensional de los senos esfenoidales, sin tener en cuenta los efectos por bilateralidad, desplazamiento y extensión de los hemisenos.

Al emplear la forma media como modelo de referencia sólo cambia el tercer componente en relación con tres propiedades: 1) el patrón topológico de los senos esfenoidales, 2) la separación entre los hemisenos y 3) el volumen de los hemisenos, demostrando que, aunque se modifique el modelo de referencia dentro del método GPSA, los resultados se mantienen consistentes, un aspecto que se buscó evaluar y que se encuentra en concordancia con lo reportado por Palamenghi *et al.* (2021) para los senos frontales, donde mencionan que la elección del modelo de referencia sólo tiene influencias significativas en casos de no coincidencias (*matches*), es decir, cuando se comparan dos modelos pertenecientes a individuos diferentes. Sin embargo, su enfoque se construyó para análisis por superposición en 3D uno a uno, sin aplicarse a muestras de gran tamaño. Para futuros análisis, se recomienda elegir al menos dos modelos de referencia al aplicar el método de identificación por GPSA, para realizar una validación y estandarización de los resultados.

En relación con los hallazgos por lateralidad, el PCA de la anidación de senos esfenoidales bilaterales necesitó más componentes para concentrar la variación presente en la muestra, mientras la anidación de senos esfenoidales unilaterales necesitó menos; sin embargo, hay que tener en cuenta que el tamaño de la segunda muestra fue menor que la primera. La caracterización de la muestra de senos bilaterales resume en su primer componente las variaciones por separación de los hemisenos, en su segundo componente las variaciones por desplazamiento de los hemisenos en plano axial o transversal y el patrón de extensión de estos —coronal para el hemiseno derecho y sagital para el hemiseno izquierdo—, y en su tercer componente las variaciones por patrón de desplazamiento de los hemisenos en plano coronal.

Por el contrario, la anidación en senos esfenoidales unilaterales presenta en su primer componente variaciones por volumen y un patrón de pneumatización desarrollado en plano axial o transversal, en su segundo componente variaciones por patrón de pneumatización en plano sagital —son senos achatados transversalmente—, y en su tercer componente variaciones por regularidad y homogeneidad en la superficie —en relación con valles, invaginaciones y agujeros notables—.

Como ya se ha ido estableciendo, quedan pendientes líneas de investigación que experimenten con la cantidad de *landmarks*, el uso de un sólo lado o hemiseno —como lo

reportado por Landi & O’Higgins (2019)— y la aplicación de postprocesos que homologuen la cantidad de vértices en la muestra (simplificación o decimación y reconstrucción), con el propósito de observar si existen diferencias en el comportamiento de los análisis, si mejora la agrupación de pares iguales y/o si se encuentran variaciones en la interpretación de los cambios morfológicos por componente principal.

De acuerdo con el estudio realizado por Auffret *et al.* (2016), los senos esfenoidales demostraron ser un fenotipo útil para identificación, obteniendo una precisión general del 100%; sin embargo, la base de su trabajo estuvo cimentada en la comparación visual y la valoración de concordancia de variantes anatómicas, a partir de un enfoque morfosκόpio evaluado entre observadores. Con el precedente de la aplicación de las técnicas de estadística multivariada empleadas en esta investigación, el patrón de unicidad con el método ALPACA fue de 100% para el análisis sin réplicas y 6.45% para el análisis con réplicas. Con el método GPSA se obtuvo un patrón de unicidad del 100%, tanto para el análisis sin réplicas como para el análisis sin réplicas empleando la forma media como modelo de referencia, anidando la muestra en senos esfenoidales bilaterales y anidando la muestra en senos esfenoidales unilaterales; por otro lado, se calculó un porcentaje de precisión de 74.19% para el análisis con réplicas y 67.74% para el análisis con réplicas empleando la forma media como modelo de referencia. En este sentido, el método que presentó mayor precisión fue el método GPSA. La Tabla 7 resume los porcentajes de precisión para identificación humana obtenidos de los clústeres.

	ALPACA (%)	GPSA (%)
Sin repeticiones	100	100
Con repeticiones	6.45	74.19
Empleando la forma media como modelo base (sin réplicas)	NA	100
Empleando la forma media como modelo base (con réplicas)	NA	67.74
Anidación muestral en senos esfenoidales bilaterales	NA	100
Anidación muestral en senos esfenoidales unilaterales	NA	100

Tabla 7. Porcentajes de precisión para identificación humana por medio de los métodos ALPACA y GPSA. NA: no aplica.

Los hallazgos de estos análisis son similares a los datos reportados por Souadiah *et al.* (2020), cuyo enfoque tridimensional presentó una exactitud de identificación del 100% y un 66.66% en su estudio con réplicas (es decir, un análisis de coincidencia efectuado entre las formas de los senos esfenoidales del mismo individuo, pero capturadas en dos momentos distintos). Estas cifras también apoyan lo descrito por Wen *et al.* (2022), cuyo patrón inicial de agrupaciones correctas fue de 65%, sin embargo, en este caso se empleó un reconocimiento visual manual. Dong *et al.* (2022) describen una precisión final del 100%, por medio del registro y la comparación de nubes de puntos y el uso del algoritmo de punto iterativo más cercano (ICP). Metodológicamente, el estudio más similar a esta tesis fue hecho por Watson (2019), quien aplicó un análisis de conglomerados para determinar un rango de valores por índice de similitud y así evaluar su precisión con propósitos de identificación, empleando radiografías para obtener la morfología poligonal de los senos frontales —área y perímetro— y logrando precisiones alrededor de 62% y 72%, cifras que también son coincidentes con las conseguidas en la presente investigación para los senos esfenoidales por el método GPSA.

En relación con algunos estudios de unicidad sobre otros fenotipos en los cuales se aplicaron técnicas de morfometría geométrica, Gordon & Steyn (2012) documentaron porcentajes de coincidencia positiva del 80% para el fenotipo del cráneo y con enfoques 2D

y 3D (Gaudio *et al.*, 2016); por otro lado, Zappa & Mazzoleni (2010) describieron un porcentaje del 90% usando modelos 3D del rostro. Jasso-Cuéllar *et al.* (2020) reportaron porcentajes de precisión generales por encima del 95% en sus análisis de individualización (también con perspectiva 2D y 3D), empleando la forma de la arcada dental anterior de individuos mexicanos. Decker & Ford (2019) obtuvieron un porcentaje promedio de coincidencias positivas correspondiente al 94.7%, utilizando modelos 3D de vértebras lumbares. Abbas *et al.* (2019) realizaron un estudio, donde proponen un método con una tasa mayor al 90% de clasificación automática para la evaluación de los rasgos morfológicos de los labios.

Trayendo más a colación los resultados del CA o *clustering* —que permitió calcular las biodistancias fenotípicas entre cada par de individuos y establecer un porcentaje de agrupamiento sobre un intervalo de confianza definido—, se observa que el individuo que sirvió como modelo de referencia o base se agrupó con su segunda iteración por debajo del valor mínimo de distancia, tanto por el método ALPACA como por el método GPSA, en correspondencia con los hallazgos encontrados por Cappella *et al.* (2019), descubriendo que en la comparación por superposición uno a uno en 3D de los senos esfenoidales pertenecientes a un mismo individuo se obtenía un valor de media cuadrática menor a 0.5 mm, en contraste con los casos de no coincidencias o exclusiones, donde el valor superaba una media cuadrática de 1.0 mm. En síntesis, el método GPSA es más eficiente e idóneo para reducir un universo muestral, mientras que el método ALPACA se puede emplear de modo complementario para robustecer una identificación. En un caso hipotético, se recomienda que los senos esfenoidales del individuo a identificar funjan como el modelo dubitado dentro de ambos métodos, ya que así se obtendría el pareo con la menor distancia fenotípica y el mayor porcentaje de agrupación.

Los resultados generales del análisis de agrupamiento son relevantes por su valor probatorio, ya que nacional e internacionalmente no existen suficientes estándares definidos para establecer niveles de confianza adecuados al dictaminar sobre una identificación/individualización. Por ejemplo, el CICR (2010) considera que los medios científicos/objetivos de identificación —como el análisis de huellas digitales, identificadores médicos individuales, análisis genéticos y la odontología— ofrecen altos grados de certeza, lo cual permite calcular la significación estadística de una coincidencia y/o reportar la

incertidumbre asociada a una técnica (en especial tratándose de comparaciones por medio del DNA), sin embargo, no se menciona un intervalo de confianza mínimo para realizar dicha determinación. Las guías y recomendaciones de la INTERPOL, la Sociedad Suiza de Medicina Forense, la Asociación Española de Antropología y Odontología Forense y la Asociación Latinoamericana de Antropología Forense señalan tres identificadores primarios: 1) huellas digitales, 2) DNA y 3) dientes, e incluyen que el proceso de identificación debe ser preciso, imparcial, científicamente confiable, validado y aceptado, además de cumplir con escrutinio legal y judicial, ubicando como identificadores o técnicas secundarias a la información médica, la valoración patológica, las circunstancias de la muerte, la estimación del intervalo *postmortem*, la antropología —en la determinación del perfil biológico para la ancestría, edad, estatura y sexo—, los artículos/documentos/efectos y ropa personal, la identificación visual, la imagenología/comparación radiográfica, la aproximación facial y la superposición fotográfica; sin embargo, estos lineamientos no reportan los niveles de confianza que deberían ser aceptados (Asociación Española de Antropología y Odontología Forense, 2013; Asociación Latinoamericana de Antropología Forense (ALAF) & Comité Internacional de la Cruz Roja (CICR), 2016; INTERPOL, 2018b, 2018a; INTERPOL Tsunami Evaluation Working Group, 2006; Schweizerische Gesellschaft für Rechtsmedizin SGRM, 2017).

Considerando los criterios *Daubert*, algunos autores emplean un umbral mínimo del 90% para determinar identificaciones positivas (Maxwell *et al.*, 2012), sin embargo, hay publicaciones que destacan por analizar y dictar con mayor detalle cuál debería ser la precisión aceptada en la aplicación de diferentes métodos —incluyendo aquellos relacionados con la identificación humana—, como el reporte de la Executive Office of the President's Council of Advisors on Science and Technology (2016), donde se establece que, por convención estadística, un intervalo de confianza del 95% se considera suficiente para evaluar tasas de error y cantidades relacionadas con la caracterización de los métodos forenses de coincidencia o comparación de características. En este sentido, Derrick *et al.* (2013) también comparten que un umbral del 95% en clasificaciones correctas e incorrectas, por medio de evaluación radiográfica, podría alcanzarse si se utiliza un protocolo y algoritmos optimizados en muestras grandes.

En otros casos más estrictos —como en el empleo de DNA— se ha recomendado fijar el umbral de probabilidad en 99.9% para considerar como cierta una identificación, no obstante, esto depende de la investigación y el consenso de las partes involucradas en la misma, estando también sujeto a la tecnología científica y metodologías actuales (Agencia Central de Búsquedas & Comité Internacional de la Cruz Roja (CICR), 2023; Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto & Comité Internacional de la Cruz Roja (CICR), 2015, 2021).

En México no existen criterios de este tipo que se encuentren normalizados en un sentido protocolario, ni tesis o precedentes jurídicos suficientes que asignen un valor probatorio claro a las identificaciones. Dentro de un contexto histórico para la identificación humana, la Coordinación General de Servicios Periciales (CGSP) (2012) sólo reconoce el uso de modelos estadísticos en datos procesados por medio de la obtención de perfiles genéticos de DNA —sin definir intervalos de confiabilidad—, reportando que una identificación positiva debe ser confirmada por al menos dos métodos, aplicando métodos alternativos cuando sea necesario o cuando otras especialidades no ofrezcan resultados positivos (Procuraduría General de la República (PGR), 2015a). La Secretaría de Gobernación, en el Acuerdo SNBP/002/2020 (2020), describe que el proceso de identificación humana debe ser multidisciplinario e integrado, para afirmar con un alto grado de certeza y más allá de toda duda razonable la pertenencia de un cuerpo o resto humano a un determinado individuo; esta sentencia también se encuentra soportada por el *Protocolo para el Tratamiento e Identificación Forense* (Procuraduría General de la República (PGR), 2015b), pero no se determinan los intervalos de confianza o porcentajes de probabilidad con los que debería venir acompañada la asignación de una categoría de identificación —ya sea positiva, negativa o inconcluyente—, para dotarla de sustento estadístico y así ofrecer un nivel de certidumbre adecuado en la dictaminación.

Ante esta problemática Quinto Sánchez (2022) menciona que una confronta fenotípica en identificación humana es definitiva al compararse con una base de datos de referencia, donde una identificación será positiva o negativa en relación con el número de coincidencias encontradas, misma que debe estar validada por probabilidades de aparición en una base de datos poblacional de referencia, para lo cual en las ciencias antropológicas

forenses se emplean intervalos de confianza de 95-99% para aceptar o rechazar una hipótesis, siendo válidos para dictaminar una identificación en un informe pericial.

El presente estudio proporciona intervalos de confianza definidos para los métodos aplicados, ya que también se pueden implementar en conjunto con el uso de bases de datos de gran tamaño. Además, tanto con el método ALPACA como con GPSA se logró una clasificación correcta del 100% con el par del individuo que se seleccionó como modelo de referencia, por lo cual cumple con el nivel de certidumbre aceptable de acuerdo con lo discutido en líneas anteriores. De igual modo, esto sitúa a la antropología virtual como un enfoque alternativo y complementario con valor probatorio dentro de los procedimientos de identificación secundaria y se espera que se estimule el desarrollo de más estudios sobre las características biológicas e individualizantes de la forma tridimensional de los senos esfenoidales —así como de los demás senos paranasales en general—, tanto en personas vivas como en personas sin vida.

Analizando frecuencias y categorizando variables en los senos esfenoidales, como su pneumatización, su dominancia o lateralidad, sus *septums* accesorios (y sus inserciones en estructuras aledañas), así como la pneumatización del proceso clinideo anterior o la pneumatización de las células de aire esenoetmoidales, Treviño-Gonzalez *et al.* (2021) reportan que en población mexicana no existen diferencias significativas respecto al sexo, pero sí existen diferencias interpoblacionales significativas. Por otro lado, mencionan una métrica denominada Evaluación de Pneumatización de Senos Paranasales, que, como su nombre lo dice, evalúa la presencia de variantes anatómicas entre todos los senos paranasales, hallándose correlacionada con el volumen total de los senos, por lo que puede emplearse como una medición confiable de la prevalencia general de diferentes configuraciones anatómicas en grandes poblaciones. Sólo algunos estudios de este tipo se han efectuado para analizar los efectos de diferentes variables en el desarrollo de los senos esfenoidales, aunque todavía no se ha logrado un consenso entre hallazgos, cambiando entre examinadores y poblaciones.

El presente trabajo de investigación produce resultados preliminares para México; como se observa en la regresión múltiple multivariada, la correlación más importante se dio entre las variables de volumen y sexo, relación que ha sido explorada desde distintas perspectivas en gran parte de la literatura científica. Badran *et al.* (2022) atribuye estas

diferencias a la profundidad de los recesos en los senos esfenoidales (siendo más profundos en individuos femeninos). Por tipo de pneumatización, tanto Bilgir & Bayrakdar (2021) como Pirinc *et al.* (2019) encontraron diferencias significativas en el tipo selar, siendo más frecuente en individuos masculinos, en contraste con Özer *et al.* (2018) y Singh *et al.* (2021), quienes detallan que el tipo más frecuente fue el postselar en masculinos. Ciertos autores reportan diferencias significativas por sexo en relación con el volumen de los senos esfenoidales, registrando volúmenes mayores en masculinos (Cohen *et al.*, 2018; Gibelli, Cellina, Gibelli, Oliva, Codari, *et al.*, 2017; Özer *et al.*, 2018; Ramos *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2021; Wanzeler *et al.*, 2019). Otras investigaciones demostraron la no existencia de diferencias significativas por sexo, a través de distintos métodos, siendo algunos de ellos: 1) el uso de la media cuadrática calculada con la distancia punto a punto para superposiciones en 3D, 2) la aplicación de una clasificación visual por grados de pneumatización, 3) la medición y evaluación del volumen y/o mediciones lineales, y 4) el análisis elíptico de Fourier, por medio de las coordenadas del contorno obtenido de modelos tridimensionales (Cappella *et al.*, 2019; Emirzeoglu *et al.*, 2007; Fujioka & Young, 1978; Güldner *et al.*, 2012; Karakas & Kavaklı, 2005; Nejaim *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2009; Robles, Rando, *et al.*, 2020; Selcuk *et al.*, 2015; Sergi *et al.*, 2020; Sherif *et al.*, 2017; Yonetsu *et al.*, 2000).

Los trabajos precedentes señalan que no hay claros indicios de dimorfismo sexual, pero ninguno había aplicado un enfoque que incluyera el análisis de la forma tridimensional de los senos esfenoidales empleando morfometría geométrica; por tanto, realizando una exploración general al PCA presentado en este estudio, se muestra que la variación de la forma en población mexicana es mayor en individuos femeninos, no obstante, la variable del sexo fue la única que no expuso diferencias significativas en la regresión múltiple multivariada —mediante visualización esto también se puede inferir observando la falta de separación por grupos en los gráficos de los componentes principales—. Debido a la gran cantidad de datos y a las limitaciones computacionales de los análisis, se sugieren más estudios específicos para evaluar el potencial discriminatorio del método GPSA en la predicción del sexo por medio de los senos esfenoidales.

En perspectiva, el análisis cuantitativo de la forma tridimensional de los senos esfenoidales es el parteaguas que distingue a esta disertación de los métodos más

tradicionales empleados por los autores que han sido mencionados, ya que la mayoría aplicó métodos basados en mediciones bidimensionales y cálculos de frecuencias a partir de variables categóricas, sin aprovechar toda la información que un modelo 3D puede ofrecer y, aunque el volumen es la única medición destacable a nivel tridimensional que llega a ser común entre algunos de ellos, aquí se utilizó sólo como una variable complementaria en los análisis, sin ser el centro del estudio, lo que sí sucede con varios investigadores (Cohen *et al.*, 2018; Emirzeoglu *et al.*, 2007; Gibelli, Cellina, Gibelli, Oliva, Codari, *et al.*, 2017; Nejaim *et al.*, 2019; J. M. M. Oliveira *et al.*, 2016; J. X. Oliveira *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2010; Ramos *et al.*, 2021; Sergi *et al.*, 2020; Tuang *et al.*, 2023). En cuanto a números muestrales, el único estudio que es comparable con esta tesis, al estar aterrizado a población hispana, es el de Treviño-Gonzalez *et al.* (2021); no obstante, en él se trabajó un total de 160 senos paranasales, poco menos de la mitad del número de individuos considerados para esta tesis y, por otra parte, ya se mencionó el tipo de variables que los autores manejaron, siendo todas ellas frecuencias de clase categórica.

En cuestión de la edad, varios estudios han concluido que el volumen de los senos esfenoidales es distinto dependiendo del grupo de edad y aumenta con la progresión continua del tiempo hasta la tercera década de vida, a partir de la cual comienza un decremento en el volumen (Cohen *et al.*, 2018; Fujioka & Young, 1978; Karakas & Kavaklı, 2005; Yonetsu *et al.*, 2000). El patrón de desarrollo diferencial más extendido indica que la pneumatización puede ser visible alrededor de los seis meses de edad, comenzándose a desarrollar propiamente cerca de los tres o cuatro años, cuando se produce la osificación de los huesos del cráneo —en particular, la concha esfenoidal—. La aireación de los senos se produce en sentido posterosuperior y alcanza la base del esfenoides antes de los diez años, terminando de madurar entre los doce y los catorce años (Fujioka & Young, 1978; Güldner *et al.*, 2012; Penning *et al.*, 2003; Sarria *et al.*, 2008; Vaid & Vaid, 2015).

Estos hallazgos, aunque tratan de ser descriptivos, siguen sin ser concluyentes acerca de las diferencias por grupos de edad, por ejemplo, Pirinc *et al.* (2019) mencionan que sólo descubrieron diferencias significativas en el volumen de los senos esfenoidales de los individuos entre cuatro y nueve años, señalando que no hubo diferencias en los grupos entre diez y sesenta años —esto se explica si consideramos que una de las etapas principales del desarrollo se da alrededor de los diez años, como se puntualizaba unas líneas más

arriba, razón por la cual continúa la pneumatización—. Por otro lado, aplicando un enfoque morfoscópico, Singh *et al.* (2021) revelaron una asociación significativa entre la edad y la extensión de los senos esfenoidales, pero no hubo relación entre la forma —representada por medio de categorías geométricas— y la presencia de *septums*; en particular, concluyeron que los individuos entre 15 y 44 años tuvieron una mayor frecuencia de pneumatización de tipo postselar, contrario a los individuos del grupo de individuos mayores a 44 años (aspecto que tendría relación con la disminución del volumen después de los treinta años). Un trabajo más que aplicó una metodología de mediciones lineales fue realizado por Schwerzmann *et al.* (2022), cuyos autores no encontraron una influencia significativa relacionada con el factor de la edad en la longitud, profundidad y altura de los senos esfenoidales. No obstante, para dicho trabajo se excluyeron individuos menores a 18 años.

Como se puede observar, pocos estudios se han efectuado para examinar una relación directa entre la forma y la edad, siendo el volumen la variable más explorada y la evaluación morfoscópica el enfoque más aplicado para tratar de encontrar una asociación (Schwerzmann *et al.*, 2022; Singh *et al.*, 2021). En este sentido, las técnicas de morfometría geométrica fueron de utilidad en la presente investigación para ofrecer algunos hallazgos en el área. Aunque se hallaron diferencias significativas entre la forma y la edad, los morfoespacios del PCA no mostraron una clara distinción entre individuos por grupos de edad, pero es posible notar una tendencia en la variación a través de los componentes principales, pues la primera dimensión acumula una mayor varianza alrededor de los individuos juveniles, para normalizarse en la segunda dimensión y después volver a incrementar en la tercera dimensión alrededor de los individuos adultos. La edad también demostró estar más correlacionada con el sexo que con las demás variables, por lo que se advierte la necesidad de promover más análisis en torno a este punto. Así, se podría concluir que los senos esfenoidales se encuentran más influenciados por la edad cuando se trata de individuos subadultos, ya que la pneumatización todavía se encuentra en desarrollo, pero cuando su curva de maduración se estabiliza —entre los 10 y los 20 años—, no hay diferencias significativas detectables, con excepción de la disminución en el volumen, cuantificable a partir de los 30-40 años, pesquisas que coinciden con la actual disertación, puesto que la media de edad de los individuos en la muestra fue de 46 años y el volumen fue la variable que destacó por ubicarse con los mayores índices de correlación (estando

presente en la relación inversa y la relación directa más importantes). No obstante, es preciso tener en cuenta dos aspectos en estos análisis para la edad: 1) se seleccionó la clasificación por grupos de edad de Landi & O'Higgins (2019) porque fue la única que se empleó con técnicas de morfometría geométrica y estadística multivariada similares a esta investigación, y 2) en la muestra para esta tesis no se registraron individuos menores a 7 años y, dado que la primera década de vida se considera una etapa crítica en el desarrollo de los senos esfenoidales, se requieren análisis más concisos para aseverar cambios morfológicos por grupo etario.

Respecto a la lateralidad, se ha dicho que los senos esfenoidales pueden diferir en pneumatización y tamaño, aún más cuando están divididos por un *septum* interesfenoidal. Esta estructura juega un papel importante en el proceso, debido a que persiste durante la expansión y la consiguiente disminución de la pneumatización de los senos esfenoidales. Por ello, aunque la aeración empieza de manera simultánea en ambos lados del hueso esfenoides, puede que los hemisenos se fusionen entre sí sólo hasta el final de su maduración —alrededor de los 70 años—. La aeración de los hemisenos parece manifestarse de modo independiente a lo largo de su desarrollo y se ha deducido que, cuando dicho desarrollo termine, los volúmenes de ambos lados podrían diferir de modo remarcado (Gibelli *et al.*, 2019; Yonetsu *et al.*, 2000).

Autores que han aportado al argumento de asimetría —y a las hipotéticas variaciones bilaterales en cuanto al volumen de los senos esfenoidales— se describen a continuación. Awadalla *et al.* (2015) mencionaron que existían diferencias significativas en los patrones de extensión lateral entre los hemisenos izquierdo y derecho, descubriéndolo a través de una serie de mediciones lineales; un hallazgo parecido fue reportado por Bilgir & Bayrakdar (2021), concluyendo que el tipo de extensión lateral era ligeramente más frecuente en el hemiseno derecho que en el izquierdo.

Cohen *et al.* (2018) encontraron diferencias significativas en el volumen del hemiseno izquierdo —que resultó ser menos voluminoso que el hemiseno derecho— asociadas a la edad, separando a la muestra en individuos menores y mayores a 65 años, pero no encontraron diferencias en el hemiseno derecho; los mismos autores no encontraron diferencias significativas entre hemisenos que estuvieran dadas por el sexo. En una investigación más detallada, Oliveira *et al.* (2016) también expusieron diferencias

significativas entre el volumen de ambos hemisenos, agregando que un mayor volumen se asoció con el tipo de pneumatización postselar (y siendo el hemiseno izquierdo el más voluminoso en términos generales). En la publicación de Özer *et al.* (2018) se determinó una correlación positiva entre los volúmenes del hemiseno izquierdo y el hemiseno derecho, pero se destaca que el hemiseno izquierdo fue más voluminoso, y se menciona que el mayor volumen se registró en la clase de pneumatización postselar y la subclase de pneumatización lateral completa —definida como la pneumatización extendida hacia el ala mayor y el proceso pterigoideo del hueso esfenoides—. Wang *et al.* (2010) de igual modo llegaron a la conclusión de que el lado izquierdo de los senos esfenoidales se extendía más lateralmente que el lado derecho, haciéndolo de manera significativa. Para Wanzeler *et al.* (2019), el hemiseno izquierdo fue el lado más voluminoso —siendo estadísticamente significativo— e incluso se obtuvo un mayor porcentaje de clasificaciones correctas —para discriminar entre individuos femeninos y masculinos— que cuando se empleó el volumen promedio de ambos hemisenos esfenoidales. Sheta *et al.* (2017), por otro lado, efectuaron mediciones lineales en ambos lados de los senos esfenoidales, reportando diferencias significativas en masculinos, pero no en femeninos.

Estos resultados hacen que el estudio de la lateralidad sea inconcluyente, a pesar de que se podría pensar que el hemiseno izquierdo es mayor en volumen y más variable en su pneumatización. Para buscar una asociación entre la forma y la asimetría, se analizó el PCA de grupos por lateralidad, donde no se encontró una discriminación notoria entre senos esfenoidales bilaterales y senos esfenoidales unilaterales, sin embargo, la mayor variación se observa acumulada por los individuos clasificados con senos esfenoidales unilaterales. La mayor correlación que tuvo la variable de lateralidad se dio con el tamaño y el volumen (hallazgo que se explica si se tiene en cuenta que para calcular dichos parámetros se deben sumar las mediciones de los hemisenos, en el caso de los senos esfenoidales bilaterales). Además, sí se encontraron diferencias significativas entre la forma y la lateralidad. Una consideración importante es que para asignar las clasificaciones de lateralidad en este trabajo —bilaterales y unilaterales— se tuvo en cuenta el tipo de septación primaria, es decir, que sólo existe un *septum* interesfenoidal que divide en dos a los senos esfenoidales, por lo que para profundizar y observar los cambios en estos resultados se recomienda la introducción de otras clases de *septum* en los análisis. Esta tesis destaca la necesidad de

explorar con mayor detalle el aspecto de la lateralidad, pero considerando cada componente por lado de forma diferencial, es decir, discriminando de manera analítica los hemisenos izquierdo y derecho de los senos esfenoidales biológicamente bilaterales.

Retomando el énfasis en el tamaño, no se encontraron antecedentes que hicieran estudios con esta variable y su influencia en la forma, salvo por el trabajo de Bolzan & Tucunduva (2012), quienes estudiaron las frecuencias de tres tipos principales de senos esfenoidales: 1) normales, 2) hiperplásicos y 3) hipoplásicos. Sin embargo, esta evaluación fue realizada con un enfoque cualitativo por observadores, reportando que el 90% de los individuos poseía senos esfenoidales de tamaño normal, el 7.5% presentaron hiperplasia y sólo el 2.5% hipoplasia. La presente tesis hace aportaciones con un enfoque cuantitativo, al indicarse que existen diferencias significativas entre el tamaño —representado por el *centroid size*— y la forma dentro de la población mexicana. Como se leyó en el párrafo previo, estas diferencias también están asociadas con la lateralidad, posiblemente por la dimensión sumada de los senos esfenoidales bilaterales; de este modo, se sugiere examinar si existen diferencias específicas por lado, así como algunas publicaciones argüían que el hemiseno izquierdo era más voluminoso en ciertos casos.

A manera de síntesis, la Tabla 8 muestra las relaciones de las diferencias significativas entre las variables exploradas y reportadas en la literatura para los senos esfenoidales.

Volumen	Tamaño	Sexo	Lateralidad	Edad	
-	-	-	Sí	-	Awadalla <i>et al.</i> (2015)
-	-	Sí	No	No	Badran <i>et al.</i> (2022)
-	-	Sí	Sí	-	Bilgicir & Bayraktar (2021)

Cappella <i>et al.</i> (2019)	Cohen <i>et al.</i> (2018)	(Emirzeoglu <i>u et al.</i> , 2007)	Fujioka & Young (1978)	Gibelli, Cellina, Gibelli, Oliva, Codari, <i>et al.</i> (2017)	Karakas & Kavaklı (2005)	Mokhasan avisu <i>et al.</i> (2019)	Nejain <i>et al.</i> (2019)	Oliveira <i>et al.</i> (2016)	Özer <i>et al.</i> (2018)	Princ <i>et al.</i> (2019)
-	Sí	No	Sí	-	Sí	-	-	No	No	Sí
-	Sí	No	-	-	-	No	No	Sí	Sí	-
No	Sí	No	No	Sí	No	-	No	No	Sí	Sí
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Sí	No	-	Sí	Sí	-	No	Sí	Sí	Sí

Singh <i>et al.</i> (2021)	Ramos <i>et al.</i> (2021)	Robles, Rando, <i>et al.</i> (2020)	Selcuk <i>et al.</i> (2015)	(Sergi <i>et al.</i> , 2020)	(Treviño-Gonzalez <i>et al.</i> , 2021)	Wang <i>et al.</i> (2010)	Wanzeler <i>et al.</i> (2019)	Yonetsu <i>et al.</i> (2000)	Presente investigación
Sí	-	No	-	-	No	-	-	Sí	Sí
No	-	-	-	-	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Sí	Sí	No	No	No	No	-	Sí	No	No
-	-	-	-	-	-	-	-	-	Sí
Sí	Sí	-	No	No	-	-	Sí	Sí	Sí

Tabla 8. Comparación de variables y sus diferencias/influencias significativas reportadas en la literatura. Sí: indica que hay diferencias/influencias significativas. No: indica que no hay diferencias/influencias significativas. -: indica que no se menciona información al respecto.

Finalmente, se trató de explorar una variable más dentro de los análisis: la población. Como se muestra en el PCA de grupos intrapoblacionales divididos por estado de procedencia, la complejidad de la variación es notoria en los primeros tres componentes principales (en particular en aquellos que pertenecen al Estado de México). A pesar de este hallazgo, no parece haber un patrón de diferenciación intragrupal, pero dadas las limitaciones del estudio actual, se sugiere evaluar con más detalle los cambios morfológicos que podrían estar asociados a ancestría. Dado el extenso número de publicaciones que han trabajado diferencias locales específicas, existen premisas que soportan la gran variabilidad global de los senos esfenoidales alrededor de diversas poblaciones geográficas, ya que se ha tratado de investigar y comparar el impacto de variables como la altitud y los cambios por diversas condiciones climatológicas y ambientales en el desarrollo, adaptación y variabilidad de los senos paranasales. En este sentido, resulta sugestivo proponer que las asimetrías entre los hemisenos de los senos esfenoidales (cuestión que se retoma líneas arriba) dependen de modo directo de la población, ya que a través de ella es que se pueden derivar las demás variables en torno a los factores y procesos que juegan un papel importante en la conformación de los senos esfenoidales, además, si introducimos en la ecuación su función participativa en la dinámica del paso del aire y el crecimiento óseo del cráneo, se vuelve necesario contar con un modelo más holístico que explique la interacción y la covarianza de los senos esfenoidales con los demás senos paranasales (Anusha *et al.*, 2015; Bilgir & Bayrakdar, 2021; de Mendonça *et al.*, 2022; Gibelli, Cellina, Gibelli, Oliva, Termine, *et al.*, 2017; Hewaidi & Omami, 2008; Hiremath *et al.*, 2018; Kajoak *et al.*, 2013; Kaplanoglu *et al.*, 2013; Lu *et al.*, 2011; M *et al.*, 2022; Márquez, 2008; Pan *et al.*, 2014; Pigliucci & Preston, 2004; Reredy *et al.*, 2014; Sevinc *et al.*, 2014; Treviño-Gonzalez *et al.*, 2021).

Consideraciones y limitaciones

La segmentación de los senos esfenoidales depende de varios factores, que, primero, están relacionados con las características y propiedades de las tomografías computarizadas, lo cual puede afectar el desempeño del observador. Algunos de estos factores incluyen la resolución, el número y el grosor de los cortes, y la posición en que haya sido tomada la tomografía. En segundo lugar, cada segmentación es un proceso que puede tardar desde 30 minutos hasta 2 horas, siendo factible mencionar la capacitación del observador. Aunque

los senos esfenoidales son una estructura fácil de visualizar radiológicamente (al considerarse cavidades de aire se muestran radiolúcidas), es necesario poseer un conocimiento suficiente de anatomía craneal para identificar las estructuras adyacentes y facilitar la detección del fenotipo en los diferentes planos de una tomografía (axial, coronal y sagital), puesto que la permanente intercomunicación de los senos paranasales dificulta la delimitación de la estructura. En tercer lugar, deben tenerse en cuenta los aspectos propios de cada individuo, como el desarrollo conforme a la edad, patologías o traumatismos; como ejemplo, es frecuente que exista agenesia de los senos esfenoidales, que sean senos esfenoidales apenas perceptibles, que el desarrollo sea fluctuante entre ambos lados (en caso de presentarse bilateralidad), o bien, se puede pensar que la estructura es unilateral ante la presencia de un *septum* pequeño. Lo anterior tiende a generar diferencias intra e interobservador relevantes en las segmentaciones, por lo que se debe tener especial cuidado con estas cuestiones. Se recomienda efectuar estudios de error para establecer con significancia estadística las diferencias entre segmentaciones.

La elección del *software* de segmentación depende de las necesidades de la investigación, pero se recomienda emplear *software* libre —como *3D Slicer*—, ya que es más fácil acceder al código fuente en el que está escrito y evaluar su desempeño, además existe la posibilidad de agregar extensiones y/o utilidades de terceros al programa, habiendo transparencia en este sentido. Algunas funciones genéricas que facilitan el proceso de segmentación a partir de una tomografía incluyen opciones de visualización y/o edición 3D en tiempo real (para observar la renderización del modelo), opciones de opacidad y transparencia, ajuste de los parámetros de escala de grises (para obtener una mejor representación de las estructuras radiolúcidas y radiopacas), herramientas para seleccionar y delimitar la región de interés, y técnicas de segmentación manuales, semi y completamente automáticas. Debido a que este tipo de tecnologías están en constante desarrollo, se recomienda siempre la supervisión y evaluación final por parte del observador.

El postprocesamiento de los modelos segmentados es otro tema que atañe a esta investigación, aquí sólo se aplicó un algoritmo de conversión a PLY para tener compatibilidad con los métodos aplicados, siendo dicho formato el recomendable para cuestiones de compartición y constitución de bases de datos. Algunos postprocesos que

requieren de exploración implican la decimación o simplificación y la reconstrucción, con el propósito de homologar las caras y/o los vértices de los modelos en una muestra, debido a que esto puede incidir en la proyección de *landmarks*, sobre todo cuando se trata de métodos o técnicas semi o completamente automáticas de registro (como fue en el caso principal del método ALPACA). Por ejemplo, Porto *et al.* (2021) recomiendan submuestrear los modelos a 5,000 puntos o vértices, aproximadamente, para equilibrar la precisión y la carga computacional. Así mismo, debe analizarse si la aplicación de estos postprocesos tiene efectos importantes, o no, en la representación biológica de la forma tridimensional de los individuos, a juzgar por las variaciones en cuanto a la presencia de irregularidades superficiales, invaginaciones, valles, agujeros y otros elementos topológicos propios de los senos esfenoidales.

A modo de resumen, desde la adquisición de la muestra hasta la captura de datos, las desventajas que conlleva el empleo de los senos esfenoidales comienzan por la falta de comunicación entre dependencias mexicanas para la compartición de datos, lo que se traduce en procedimientos y parámetros no estandarizados para las tomografías computarizadas (bajo una perspectiva de uso forense), insuficiencia en infraestructura para el almacenamiento de los archivos digitales en bases de datos y acceso limitado a estas, mermado también por la ineficiencia de los procedimientos burocráticos de obtención de la información y la carencia de servicios de imagenología médica en el país, a los que no todas las personas pueden asistir. Una vez concentradas las tomografías computarizadas, se presenta el reto de evaluar su calidad, lo que establecerá su utilidad para segmentación; esto se puede determinar a través de parámetros técnicos como el número y/o grosor de los cortes, o bien, de modo visual, por medio de la observación de la región de interés y su radiodensidad que, dependiendo del caso, se puede optimizar seleccionando los valores de *threshold* adecuados o aplicando filtros para mejorar la escala de grises de la tomografía. Para la etapa de segmentación, uno de los obstáculos más grandes implica tener un buen conocimiento de la anatomía de la estructura, que no sólo se restringe a los senos esfenoidales, sino también a sus estructuras adyacentes, en particular sus delimitaciones con los demás senos paranasales, por lo que es recomendable dominar la localización de estos, así como del hueso frontal, esfenoides, maxilar y etmoides, que son los que los contienen; por consiguiente, si estos huesos se encuentran lesionados, en especial el

esfenoides, la segmentación se dificulta; algunas consideraciones relevantes involucran que: 1) no se halle fragmentado el hueso esfenoides, porque podría resultar en senos esfenoidales incompletos y/o 2) la pneumatización no esté afectada en su desarrollo, derivado de la acumulación de materia en cavidades cuyo único volumen está compuesto de aire; sin embargo, mientras el primer caso aún podría abordarse trabajando con el lado intacto (si sólo uno se mostró dañado y se trata de senos esfenoidales con más de un hemiseno), el segundo se complica si no hay registro de la historia de vida de la persona con el cual comparar a lo largo del tiempo. Esta última sentencia es quizá la más fundamental de todas, debido a que, si no se cuenta con información previa que sirva de cotejo para cualquier tipo de análisis, no será viable llevar a cabo una identificación, de aquí surge la necesidad de construir mejores bases de datos.

Respecto a los senos esfenoidales en sí, la desventaja más relevante en la segmentación se halla en delimitarlos correctamente, pues su interacción con los otros senos paranasales, vuelve compleja la tarea de demarcarlos al no tener una frontera bien definida; no obstante, la manera más fácil de reconocer los límites de los senos esfenoidales es ubicando las paredes de la silla turca, ya que la pneumatización suele estar contenida en ellos; en su plano anterior, los senos esfenoidales desembocan a la cavidad nasal por medio del receso esfenoetmoidal; en su plano posterior, los senos esfenoidales se pueden extender hasta el *clivus* (entre el *dorsum sellae* y la parte basilar del hueso occipital); en sus laterales, los senos esfenoidales también pueden pneumatizarse hacia los procesos pterigoideos, la pared medial de los senos cavernosos y más allá del canal vidiano y el foramen *rotundum*; además, la pared superior de los senos esfenoidales se encuentra formada por el *planum sphenoidale* y el piso de la silla turca, mientras su pared inferior colinda con la nasofaringe en la base del cráneo. Otra recomendación preliminar supone retomar la clasificación tradicional de los senos esfenoidales en conchales, preselares, selares y postselares, de este modo se simplifica la labor de identificarlos, porque, sin importar el tamaño que tengan, lo único que se tendrá como referencia será su forma.

Pasando a las técnicas de segmentación, el tiempo es la desventaja más importante, pues, aunque las técnicas semiautomatizadas y automatizadas pueden llamar a atención, éstas todavía no están libres de errores y al final deben ser perfeccionadas manualmente por el observador, borrando los excesos de segmentación o llenando agujeros. Como se ha

mencionado, entre el reconocimiento de los senos esfenoidales y el término de la segmentación, el tiempo puede ir desde 30 minutos hasta 2 horas, aproximadamente, siendo este un factor que deberá valorarse al realizar una identificación; no obstante, si se continúan incorporando bases de datos con los modelos tridimensionales que aquí se presentan, el analista, investigador, observador, perito o técnico sólo tendrá la tarea de segmentar el modelo dubitado e introducirlo a la muestra indubitada para realizar los análisis correspondientes, reduciendo en gran medida el trabajo al que se comprometería en una clásica comparativa uno a uno.

El renderizado y postprocesamiento son dos etapas en donde la diferencia en el número de vértices en los modelos 3D queda a discusión como una desventaja, aunque los resultados preliminares de esta tesis son favorables; por ejemplo, si bien una siguiente línea de investigación sería la estandarización de este número de vértices, se demostró que dicha diferencia no afectó al agrupamiento del modelo prototipo con su par, bajo ninguno de los dos métodos (ALPACA y GPSA), y en general se obtuvo una buena precisión en el análisis con iteraciones por GPSA, por consiguiente, es sugerente hipotetizar si mejoraría el desempeño del modelo estadístico homologando el número de vértices como un uso análogo a los *landmarks*.

El acceso al *software* es una de las notables ventajas que tiene la propuesta de estos métodos, ya que todos son de acceso libre y descarga gratuita, por lo que no hay que invertir en este apartado, desde *3D Slicer* para la segmentación y el renderizado, *MeshLab* para el postprocesamiento, *SlicerMorph* (que incluye ALPACA) y el *software gpsa* para la obtención de las variables de forma, hasta *RStudio* y *Past* para los análisis estadísticos. En cuanto a la utilización de todos ellos, superar la curva de aprendizaje no es complicado, debido a la gran cantidad de guías, manuales, tutoriales y videos que se pueden encontrar y se hallan en constante actualización en internet; además, hablando en particular de *RStudio*, el código empleado para los análisis de esta tesis se puede compartir con el fin de que sea replicado y reproducido sin dificultad, simplemente adecuando los parámetros de importación, transformación y manejo de los datos.

En retrospectiva, este trabajo está diseñado con un enfoque inter y multidisciplinario, para que quien esté interesado pueda ser capacitado en la aplicación de la metodología presentada (como se verá más adelante en el *Protocolo de trabajo*), de

manera que también se espera que sirva para apoyar los procesos de identificación, a través de la instrucción de recursos humanos que reduzcan los tiempos de análisis mediante la segregación de funciones, ya sea, por ejemplo, realizando segmentaciones, procesando los modelos tridimensionales, preparando la información, ejecutando los programas o incorporando las bases de datos. Omitiendo estos precedentes, la principal desventaja continúa siendo el acceso a tomografías computarizadas, desde el punto de vista civil (entender cuántas personas tienen acceso a este servicio) y burocrático (saber cómo disponer de las bases de datos).

En representación de los métodos morfogeométricos seleccionados, conviene hablar por separado de ellos. El método ALPACA requiere de escoger un modelo que sirva de base o como referencia para la proyección de los *pseudolandmarks* en una muestra de individuos. Esto, a su vez, implica registrar en el modelo base una plantilla con el número de *pseudolandmarks* que se emplearán. Con estas premisas, se sugiere proceder con una curva de evaluación de muestreo de *landmarks*, para calcular la cantidad de *landmarks* óptimo que caracterice, con un nivel de confianza de 95-99%, la morfología del fenotipo.

El método GPSA también requiere de un modelo base, pero, en este caso, el producto del análisis son las coordenadas homologadas ponderadas entre todos los modelos; aquí es donde incide con mayor relevancia la decisión de aplicar postprocesos a la muestra, para estandarizar el número de vértices.

Ahora bien, para la elección del modelo de referencia hay una serie de criterios importantes que se podrían considerar, pero, inicialmente, el modelo base se recomienda que provenga del individuo a identificar, ya que se trataría del modelo dubitado. Otros elementos para tener en cuenta incluyen la resolución del modelo (traducido como aquel que posea mayor cantidad de caras y vértices, en caso de que no se puedan realizar postprocesos), y la lateralidad (por ejemplo, si el modelo dubitado es unilateral, se debe comparar con una base de datos referencial de modelos unilaterales); en general, se recomienda que se aprovechen ambos hemisferios para cualquier tipo de análisis (siempre que sea posible), dado que esto aumenta el nivel de individualización. En la actualidad, se está acrecentando la implementación de métodos por superposición o registro de nubes de puntos tridimensionales que facilitan el estudio de la morfología, en los cuales ya no es necesaria la selección de una plantilla o modelo base, como la plataforma *SlicerSALT* (que

emplea una extensión para computar modelos de distribución de puntos con base en armónicos esféricos para su aplicación en análisis de forma) o la extensión *Auto3dgm*, instalable en *3D Slicer*, que usa un procedimiento automático para colocar *landmarks* en superficies que carecen de puntos anatómicos homólogos o son demasiado disimilares para utilizar métodos fundados en plantillas; lo anterior, en conjunto con técnicas estadísticas clásicas y novedosas, simplifican el trabajo con datos de alta dimensionalidad y ofrecen nuevas opciones de análisis que amplían los horizontes para el estudio de cambios fenotípicos complejos, ya sea en los senos esfenoidales, los senos paranasales u otras estructuras anatómicas (Boyer *et al.*, 2015; Collyer *et al.*, 2015; Rolfe, Pieper, *et al.*, 2021; Vicory *et al.*, 2018; Vitek *et al.*, 2017).

Como se ha estipulado dentro del marco de ALPACA y GPSA, el desarrollo de estos métodos gira en torno a dos principios: 1) el uso de una plantilla que sirva como base para la caracterización morfológica y 2) el manejo de grandes conjuntos de datos anatómicos. A su vez, la literatura sugiere dos enfoques inmediatos para continuar con la investigación a corto y mediano plazo: 1) la morfometría geométrica basada en deformación (*deformation-based geometric morphometrics*) y 2) el algoritmo *auto3dgm*. El primero retoma el principio de la utilización de una plantilla, es decir, un modelo base o prototipo, promediado a partir de una muestra de conjuntos de puntos (*landmarks*) y superficies deformadas, empleando el concepto de corrientes (*currents*), a través del cual se captura la geometría de una estructura preservando su topología, se optimizan los parámetros de deformación independientes a los de forma, y se lidia con las discrepancias por carga de densidad (Durrleman *et al.*, 2012; Glaunès & Joshi, 2006; Vaillant & Glaunès, 2005). Ante la demostrada variabilidad de los senos esfenoidales, un método fundado en la morfogeometría de deformación podría resultar ideal, bajo los siguientes dos argumentos: a) no es necesario contar con una correcta superficie topológica, considerando los accidentes, valles, agujeros y otras características observables en los modelos 3D debido al desarrollo de la pneumatización; y b) se superan diferencias por densidad, representadas en las áreas más complejas de los senos esfenoidales, donde un plano del *mesh* que conforma la superficie puede sumar grandes cantidades de vértices, mientras otro plano carece de ellos; en particular, esta carga de densidad es más evidente en senos esfenoidales con dos o más hemisenos, con un hemiseno acumulando más vértices que otros o cuando los

hemisenos están interconectados por mínimas zonas de pneumatización, aspecto que termina afectando el proceso de registro o proyección de *landmarks* (cuando se hace uso de una plantilla). Por el contrario, existen algunos factores que salen a la luz y deben ser atendidos antes de la aplicación del método, como: a) más investigación alrededor de los senos esfenoidales con dos o más hemisenos, estudiándolos en conjunto y por separado, b) establecer la aproximación geométrica más idónea para definir la morfología inicial (elipsoide, esférica u otra) con base en la anatomía de los senos esfenoidales, c) la definición de puntos control o de correspondencia, teniendo en cuenta los resultados de la caracterización morfológica, d) la definición del número de *landmarks* óptimo por medio de la aplicación de curvas LaSEC, y e) la principal ventaja, el cálculo de una forma media con fundamento en los datos anatómicos de la muestra, dejando fuera la subjetividad que conlleva ser seleccionada por el observador.

Parecido al método de morfogeometría basada en deformación y en esta línea del estado del arte, nace el enfoque denominado SPHARM-PDM (*SP*herical *HA*rmonic *R*epresentation-*P*oint *D*istribution *M*odels), constituyente en un conjunto de herramientas automatizadas que funciona como una solución al problema de correspondencia, también bajo la definición previa de un elipsoide alineado y la parametrización esférica para cada estructura en una muestra, asumiendo la correspondencia entre puntos equivalentes (Paniagua *et al.*, 2012). SPHARM-PDM preserva el área de la malla de *voxels* que constituye el modelo 3D y lo mapea sobre una esfera en un dominio de parámetros separado; dado que las funciones base de la esfera son armónicos esféricos, el método describe una estructura como un grupo de pesos de función base y al truncar el número de estas funciones empleadas en la descripción, se pueden representar distintos niveles de detalle en la estructura (Durongbhan *et al.*, 2022; Styner *et al.*, 2006; Vicory *et al.*, 2018). Su aplicación consiste en tres pasos: 1) preprocesamiento, 2) parametrización y 3) SPHARM-PDM. El primer paso requiere la entrada de una segmentación binaria (segmento 2D), donde se asegure una topología esférica y limpia (sin excedentes ni agujeros internos), así como una resolución óptima; en el segundo paso se extrae la superficie por *voxels* a partir de la segmentación y se crea el área que mapea la superficie sobre una unidad esférica; por último, en el tercer paso se calcula la representación SPHARM-PDM, la cual incluye la descripción del armónico esférico, su conversión a una superficie triangulada

(*mesh*) y la resolución de los problemas por correspondencia y alineación. Al final del procedimiento, se obtiene una esfera y el modelo construido a partir de ella (ambos con el mismo número de puntos) y mapas de calor que exhiben la correspondencia entre los modelos 3D, utilizando un código de color para mostrar la información de la parametrización esférica y, en términos descriptivos, las áreas en la estructura con diferencias morfológicas. Más adelante, con esta información se puede llevar a cabo un análisis de Procrustes para estudios morfométricos (Pascal *et al.*, 2022). Antes de suponer como una ventaja o desventaja que este método y la morfometría geométrica basada en deformación se restrinjan a estructuras con una topología preliminar, el hecho es que se debe precisar más investigación para descubrir si su aplicación favorecería al estudio morfológico de los senos esfenoidales, ya que la caracterización sí sugiere que su pneumatización mantiene un patrón de geometría esférica o elipsoide.

Por otra parte, el algoritmo *auto3dgm*, desarrollado por Boyer *et al.* (2015), podría resultar más atractivo en la práctica, debido a que prescinde por completo de una forma media para alinear y registrar puntos en modelos 3D, siguiendo cuatro pasos básicos: 1) remuestrear las coordenadas de las superficies o modelos bajo un número estándar, 2) aplicar un procedimiento iterativo de punto más cercano, 3) computar los ejes principales de variación y 4) alinear las superficies a partir de los ejes principales. Mientras el usuario sólo debe establecer el número de *pseudolandmarks* y el número de iteraciones para hallar la alineación óptima en la muestra de modelos 3D, el resultado directo de este método es el conjunto de *pseudolandmarks* y sus coordenadas provenientes de la muestra empleada, las cuales pueden ser utilizadas para análisis estadísticos clásicos por morfometría geométrica. Entre las ventajas de este método se encuentra la determinación automatizada de correspondencia entre puntos por medio de un sistema matemático (evitando el sesgo cualitativo de colocación por el observador); la facilidad de trabajar con modelos de resolución baja o reducida (que se traduce en una poca cantidad de vértices), debido a que las superficies más densas son transformadas o alineadas para coincidir con las menos densas; y la consistencia entre los *pseudolandmarks* y las superficies, que rescata la fidelidad topológica tridimensional de las estructuras, sin limitar los *landmarks* a su clasificación más tradicional (Rolfe, Pieper, *et al.*, 2021). Lo anterior, aterrizado a los senos esfenoidales, concede flexibilidad al manejo de la muestra, ya que no demanda tomar una

decisión para seleccionar una forma prototipo que sirva como plantilla; no interviene con la compleja topología del *mesh*, evitando en cierto grado el postprocesamiento de los modelos y ayudando a reducir los efectos ocasionados por los parámetros de adquisición de la tomografía, además, el número óptimo de *pseudolandmarks* puede calcularse realizando una curva LaSEC, por lo que esta técnica puede usarse como paso previo y complementaria a la aplicación del algoritmo. No obstante, una de las desventajas del método por *auto3dgm* es que presenta sensibilidad al ruido en los modelos 3D, pues, aunque es tolerante a la resolución de los *meshes*, la segmentación de los senos esfenoidales debe realizarse de la manera más limpia posible; así mismo, aún existen paradigmas en torno a la morfometría de alta densidad y al tratamiento de vastos conjuntos de datos, a pesar de que, en el caso de la morfometría geométrica, se ha establecido que incrementar el número de *landmarks* puede incrementar la consistencia en los resultados, hipótesis que se sustenta en esta tesis, donde el método GPSA se destaca por sobre el método ALPACA.

Hablando de las consideraciones para la *praxis*, desde una perspectiva general, las aplicaciones bioantropológicas de los métodos descritos son amplias, comenzando por su utilidad en la caracterización de diferencias morfológicas poblacionales, por ejemplo, para la construcción de atlas que sinteticen, mediante los hallazgos por deformación, las características anatómicas y los cambios de forma de los senos esfenoidales en población mexicana (algo que incluso añadiría un componente morfoscópico a los trabajos de identificación), o bien, atlas que plasmen dichas variaciones por edad, sexo u otras variables. Comentando desde una perspectiva más particular, estos métodos podrían sacar a la luz disimilitudes que sólo son visibles en niveles inferiores de los espacios dimensionales multivariados, los cuales abonarían conocimiento, desde una aproximación cualitativa, a los procesos de individualización. En este sentido, mientras los métodos libres de *landmarks* y los que realizan comparaciones directas entre superficies podrían recibir mayor interés, la realidad es que aquellos basados en plantillas también son auxiliares para la individualización, a pesar de que no se cuente con una forma media desde el principio o durante el análisis, puesto que la misma estructura dubitada puede fungir el papel de prototipo, facilitando la elección hecha por el observador y disminuyendo el universo muestral, si este es el caso. Sin embargo, un hecho claro es que el estado del arte debe virar a mejorar la implementación de las herramientas y técnicas estadísticas, para así aprovechar

de un modo óptimo estos métodos morfogeométricos innovadores, sobre todo los que involucran grandes acervos de datos, de esta manera, se acelera y favorece su incursión al interior de la práctica forense.

Finalmente, como ha quedado estipulado, el enfoque de esta investigación fue tridimensional, gracias a la aportación de las tomografías computarizadas y la decisión de aprovechar sus tres componentes espaciales, haciendo uso del estado del arte y técnicas más vanguardistas, por lo que también se debe estimular el desarrollo de estudios centrados en aproximaciones bidimensionales, principalmente con el uso de radiografías o estandarizando cortes y vistas específicas desde las propias tomografías computarizadas, con el objetivo de examinar el comportamiento que siguen los datos de la variabilidad morfológica de los senos esfenoidales en dicha dimensión condicionada.

Protocolo de trabajo

La Tabla 9 es un esquema que representa una propuesta metodológica, a modo de guía, con la secuencia esencial de pasos a seguir para realizar una identificación a través de la forma tridimensional de los senos esfenoidales; aplicando técnicas de antropología virtual, morfometría geométrica y estadística multivariada. Se acompañan algunas notas para apoyar la toma de decisiones en puntos que se consideran importantes dentro del diseño metodológico. Se sugiere que este protocolo sea evaluado en el ámbito pericial, planteándose como un proceder inicial para fortalecer la *praxis* forense por medio de la estandarización del empleo de este fenotipo en la identificación humana.

I. Segmentación y renderizado tridimensional de los senos esfenoidales
<p>En el <i>software 3D Slicer</i>:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Importar la tomografía computarizada (archivos con datos DICOM). 2. Ajustar las vistas 2D y 3D. 3. Seleccionar la región de interés 4. Emplear herramientas de opacidad y <i>presets</i> para optimizar la visualización de la estructura anatómica. 5. Segmentar manualmente a través de la técnica de <i>thresholding</i>. 6. Se recomienda comenzar con un rango de valores entre -1024 y -300 para los senos paranasales. 6. Exportar del modelo renderizado en formato PLY. <ul style="list-style-type: none"> • Este formato es necesario para mantener la compatibilidad entre análisis.
II. Postprocesamiento de los modelos tridimensionales
<p><i>Software</i> recomendado: <i>3D Slicer, Meshlab</i>.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Reducir el ruido, los agujeros y/o el exceso de segmentación en el modelo. 2. Aplicar algoritmos de <i>decimación</i>/simplificación o reconstrucción para estandarizar el número de vértices/caras de los modelos en la muestra.
III. Elección del modelo base*
<p>Considerar:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. El modelo digitado de los senos esfenoidales del individuo a identificar. 2. La tomografía computarizada con mayor resolución (número de cortes, nitidez de las estructuras, definición de los límites anatómicos). 3. El modelo 3D con mayor resolución. <ul style="list-style-type: none"> • Se recomienda comenzar con modelos que cumplan un estándar de 5,000 a 6,000 vértices. 4. La frecuencia de senos esfenoidales bilaterales y unilaterales. <ul style="list-style-type: none"> • Se recomienda emplear la muestra completa y después analizar estadísticamente los subconjuntos bilaterales y unilaterales por separado.
IV. ALPACA*
<p>En el <i>software 3D Slicer</i>:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Crear la plantilla de <i>landmarks</i> con el modelo base: <ul style="list-style-type: none"> • Cargar el modelo elegido en formato PLY al entorno de trabajo de <i>3D Slicer</i>. • Dirigirse al módulo <i>SlicerMorph > Geometric Morphometrics > PseudoDMGenerator</i>. • Seleccionar el modelo base. • Registrar el valor predeterminado del parámetro <i>Spacing tolerance</i>. • Obtener el número <i>submuestreo de landmarks</i>. • Exportar el archivo con las coordenadas de <i>landmarks</i> del modelo base en formato FCSV. 2. Colocar los modelos tridimensionales de la muestra en formato PLY dentro de una misma carpeta. 3. Dirigirse al módulo <i>SlicerMorph > Geometric Morphometrics > ALPACA > Batch processing</i>. 4. Seleccionar el modelo base y sus <i>landmarks</i>. 5. Seleccionar la carpeta con la muestra de modelos. 6. Seleccionar el directorio donde se exportarán los archivos FCSV con las coordenadas de <i>landmarks</i>. 7. Ejecutar el <i>autolandmarking</i>.
V. Evaluación del número de <i>landmarks</i>*
<p>En el <i>software R</i>:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Con los archivos FCSV, construir una matriz de tipo $n \times m$ (donde n son los individuos, ordenados en filas, y m las coordenadas de <i>landmarks</i>, ordenadas en columnas). 2. Cargar la librería <i>LaMBDA</i> para calcular la curva de evaluación de muestreo de <i>landmarks</i> (LaSEC), usando la función <i>lasec</i>. 3. Estimar el número óptimo de <i>landmarks</i> con base en un intervalo de confianza del 99% y 100 iteraciones. 4. Repetir el paso IV. ALPACA, ajustando el parámetro <i>Spacing tolerance</i> del punto 1.4, de acuerdo con el número de <i>landmarks</i> óptimo estimado.
VI. Obtención de las variables de forma
<p>Si se aplica el método ALPACA:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. En <i>3D Slicer</i>, dirigirse al módulo <i>SlicerMorph > Geometric Morphometrics > GPA</i>. 2. Seleccionar los archivos FCSV de los individuos de la carpeta del punto 6 del paso IV. ALPACA. 3. Seleccionar el directorio de salida para los análisis. 4. Ejecutar GPA + PCA. <ul style="list-style-type: none"> • En la carpeta seleccionada se encontrará el archivo <i>OutputData.csv</i>, que contiene las coordenadas de <i>landmarks</i> transformadas en coordenadas de Procrustes. <p>Si se aplica el método GPSA:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. En <i>ggvs4</i>, seleccionar el archivo prototipo en formato PLY. 2. Seleccionar la carpeta donde se encuentra la muestra de modelos (incluyendo el modelo de referencia). 3. Ejecutar el análisis generalizado de Procrustes de superficie. <ul style="list-style-type: none"> • En la carpeta de los modelos se encontrará un archivo con la cadena <i>homologized points</i> en formato DAT, mismo que posee las coordenadas homologadas de los vértices de los modelos.
VII. Análisis de componentes principales (PCA)
<p>En el <i>software R</i>:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Importar las variables de forma (las coordenadas de Procrustes o las coordenadas homologadas de los vértices). 2. Realizar el PCA con la función <i>prcomp()</i> y los parámetros <i>scale = F</i> y <i>center = T</i>. <ul style="list-style-type: none"> • El parámetro <i>scale = F</i> permite hacer el análisis con la matriz de varianza-covarianza. 3. Registrar el número de componentes que acumulan el 95% de la varianza con la función <i>numcomp()</i>. 4. Exportar los <i>PC scores</i> de los individuos.
VIII. Análisis de conglomerados (CA)
<p>En el <i>software Past</i>:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Importar los <i>PC scores</i> de los individuos. 2. Seleccionar los componentes que acumulan el 95% de la varianza. 3. Dirigirse a <i>Multivariate > Clustering > Cluster</i>. 4. Introducir un a cantidad de 10,000 permutaciones. 5. Computar el CA para individualización.

Tabla 9. Protocolo de trabajo para identificación humana a través de los métodos ALPACA y GPSA. *El paso III es necesario para ambos métodos (ALPACA y GPSA), mientras que los pasos IV y V son únicos para el método ALPACA.

Capítulo VI. Conclusiones

My own examination was much more complete and exact—and for the reasons I have just given—because here it was necessary, I knew, to prove that what only *seemed* to be impossible was, in fact, possible.

—Edgar Allan Poe, Edgar Allan Poe’s Murders in the Rue Morgue and The Gold Bug

En relación con los objetivos, se presentan las siguientes conclusiones:

- I. Se segmentaron 348 tomografías computarizadas provenientes del Hospital General de México y se renderizaron los modelos tridimensionales correspondientes a los senos esfenoidales de los individuos, estableciendo que estos modelos pueden emplearse para capturar coordenadas de *landmarks* —obtenibles por el método ALPACA— y coordenadas homologadas de vértices —extraíbles por el método GPSA— para su uso forense en estudios de repetibilidad y reproducibilidad que involucren técnicas de antropología virtual, morfometría geométrica y estadística multivariada.
 - a. Los datos capturados de la muestra son relevantes para el campo de la identificación, debido a que a la fecha de presentación de esta tesis no existe una base con información relacionada a la morfología tridimensional de los senos esfenoidales para población mexicana, además, los métodos propuestos por ALPACA y GPSA no sólo permitirán reducir universos muestrales sin recurrir a comparaciones uno a uno, sino que también ofrecerán un enfoque cuantitativo, al poder asociar cada individualización con un porcentaje de similitud dubitado-indubitado basado en un modelo de biodistancias fenotípicas.
- II. Se fenotipó un protocolo de 130 *pseudolandmarks* para caracterizar la forma tridimensional de los modelos de los senos esfenoidales, con base en un criterio del 99% de confianza y 100 iteraciones, demostrando que la curva de evaluación de muestreo de *landmarks* (LaSEC), propuesta por Watanabe (2018), es un procedimiento que se recomienda para validar el número de puntos a registrar para capturar un fenotipo determinado, y con el cual se automatizan y reducen los procesos computacionales al utilizar una menor cantidad de información.
- III. Con el análisis de componentes principales se observó una gran varianza fenotípica en la morfología tridimensional de los senos esfenoidales por el método GPSA, a

diferencia del método ALPACA, en donde los cálculos arrojaron valores de varianza pequeños.

- a. Estos resultados se deben a la falta de proporcionalidad (calculada con el estadístico de Procrustes) entre los conjuntos de datos de ambos métodos, considerando las diferencias en la dimensionalidad de las variables de forma de ALPACA y GPSA, siendo mayor la dimensionalidad en este último.

IV. La caracterización de la forma tridimensional de los senos esfenoidales en individuos mexicanos indica:

- a. Que la región medial, en vista coronal, es la que acumula la mayor variación en la muestra, debido a la presencia del *septum* principal que genera la división para la presencia de hemisenos, lo cual produce las pneumatizaciones esfenoidales bilaterales y unilaterales.
- b. Que la primera dimensión del análisis de componentes principales resume la variación de la forma en senos bilaterales y unilaterales, así mismo, se asocia con una mayor amplitud superoinferior de la pneumatización.
- c. Que la segunda dimensión del análisis de componentes principales se relaciona con senos esfenoidales de tipo selar, con una mayor extensión neumática en sentido laterolateral (a la altura del foramen *rotundum*) y una menor amplitud anteroposterior y superoinferior.
- d. Que la tercera dimensión del análisis de componentes principales resume la variación en senos esfenoidales de tipo postselar y que se extienden en dirección hacia los procesos pterigoideos.

V. Aplicando el método GPSA, se estableció que la correlación negativa más importante se encuentra entre las variables de sexo y volumen; por el contrario, la correlación directa destacada se da entre el volumen y el tamaño. En ambos casos, los índices de Pearson fueron pequeños, pero estadísticamente significativos.

- a. Tanto en la regresión multivariada con todas las variables como en las regresiones individuales, se hallaron diferencias estadísticamente significativas de la forma contra la edad, el tamaño, el volumen y la lateralidad, pero no con la variable del sexo.

- VI.** El patrón de unicidad de los senos esfenoidales, por medio de análisis de conglomerados, implica lo siguiente:
- a.** Ambos métodos, ALPACA y GPSA, generaron porcentajes de individualización del 100% en los análisis sin iteraciones.
 - b.** Los análisis con iteraciones demostraron un mayor potencial individualizante a través del método GPSA, donde se obtuvo un porcentaje de agrupaciones correctas del 74.19%, mientras que por el método ALPACA se calculó un porcentaje del 6.45%.
 - c.** Empleando la forma media como modelo de referencia en el método GPSA se estimó un patrón de individualización del 100%, sin iteraciones, mientras que la precisión de agrupaciones correctas fue del 67.74% al introducir iteraciones.
 - d.** Submuestreando los datos en senos esfenoidales bilaterales y unilaterales se mantuvo un patrón de unicidad del 100%, al realizar el análisis sin iteraciones por GPSA.
- VII.** Se aceptó la hipótesis enunciada, demostrando que los valores de varianza fenotípica son grandes para los senos esfenoidales en población mexicana y que los porcentajes del patrón de unicidad son del 100% en todos los análisis sin iteraciones, considerando que el cálculo se realizó al nivel mínimo de distancia fenotípica, tanto por el método ALPACA como por GPSA.

Referencias

- Abbas, H. H., Hicks, Y., Zhurov, A., Marshall, D., Claes, P., Wilson-Nagrani, C., & Richmond, S. (2019). An automatic approach for classification and categorisation of lip morphological traits. *PLOS ONE*, *14*(10), e0221197. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221197>
- Abdulghani, Y. S. (2021). Sphenoid Sinus Pneumatization Assessment in Sudanese Population; MRI Study. *Asian Journal of Research and Reports in Neurology*, *4*(2), 16–20. <https://www.journalajorrin.com/index.php/AJORRIN/article/view/30123>
- Abdullah, B., Lim, E. H., Husain, S., Snidvongs, K., & Wang, D. Y. (2018). Anatomical variations of anterior ethmoidal artery and their significance in endoscopic sinus surgery: a systematic review. *Surgical and Radiologic Anatomy*, *41*(5), 491–499. <https://doi.org/10.1007/s00276-018-2165-3>
- Agencia Central de Búsquedas, & Comité Internacional de la Cruz Roja (CICR). (2023). *EL PROCESO FORENSE DE IDENTIFICACIÓN HUMANA: UN ENFOQUE INTEGRADO*. Comité Internacional de la Cruz Roja (CICR).
- Ahmadipour, Y., Lemonas, E., Maslehaty, H., Goericke, S., Stuck, B. A., El Hindy, N., Sure, U., & Mueller, O. (2016). Critical analysis of anatomical landmarks within the sphenoid sinus for transsphenoidal surgery. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, *273*(11), 3929–3936. <https://doi.org/10.1007/S00405-016-4052-Z>
- Alam-Eldeen, M. H., ElTaher, M. A., & Fadle, K. N. (2018). CT evaluation of pterygoid process pneumatization and the anatomic variations of related neural structures. *The Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*, *49*(3), 658–662. <https://doi.org/10.1016/j.ejrn.2018.03.011>
- Anderson, T. W. (2003). *An Introduction to Multivariate Statistical Analysis* (3a ed.). John Wiley & Sons.
- Anusha, B., Baharudin, A., Philip, R., Harvinder, S., Shaffie, B. M., & Ramiza, R. R. (2015). Anatomical variants of surgically important landmarks in the sphenoid sinus: a radiologic study in Southeast Asian patients. *Surgical and Radiologic Anatomy*, *37*(10), 1183–1190. <https://doi.org/10.1007/s00276-015-1494-8>

- Arnqvist, G., & Mårtensson, T. (1998). Measurement error in geometric morphometrics: empirical strategies to assess and reduce its impact on measures of shape. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 44(1–2), 73–96.
- Asociación Española de Antropología y Odontología Forense. (2013). *RECOMENDACIONES EN ANTROPOLOGÍA FORENSE* (F. Serrulla, Ed.). Asociación Española de Antropología y Odontología Forense.
- Asociación Latinoamericana de Antropología Forense (ALAF), & Comité Internacional de la Cruz Roja (CICR). (2016). *Guía latinoamericana de buenas prácticas para la aplicación en antropología forense (GLAAF)*.
- Auffret, M., Garetier, M., Diallo, I., Aho, S., & Ben Salem, D. (2016). Contribution of the computed tomography of the anatomical aspects of the sphenoid sinuses to forensic identification. *Journal of Neuroradiology*, 43(6), 404–414. <https://doi.org/10.1016/J.NEURAD.2016.03.007>
- Awadalla, A. M., Hussein, Y., & ELKammash, T. H. (2015). Anatomical and Radiological Parameters of the Sphenoid Sinus among Egyptians and its Impact on Sellar Region Surgery. *Egyptian Journal of Neurosurgery*, 30(1), 1–12.
- Badran, K., Tarifi, A., Shatarat, A., & Badran, D. (2022). Sphenoid sinus pneumatization: the good, the bad, and the beautiful. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 279(9), 4435–4441. <https://doi.org/10.1007/s00405-022-07297-8>
- Bagga, S., Gupta, S., & Sharma, D. K. (2019). Computer-Assisted Anthropology. In *Internet of Things in Biomedical Engineering* (pp. 21–47). Academic Press, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817356-5.00002-4>
- Bardua, C., Felice, R. N., Watanabe, A., Fabre, A.-C., & Goswami, A. (2019). A Practical Guide to Sliding and Surface Semilandmarks in Morphometric Analyses. *Integrative Organismal Biology*, 1(1), obz016. <https://doi.org/10.1093/IOB/OBZ016>
- Barros, F. de, Fernandes, C. M. da S., Kuhnen, B., Scarso Filho, J., Gonçalves, M., & Serra, M. da C. (2021). Paranasal sinuses and human identification. *Research, Society and Development*, 10(9), e48710918161. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i9.18161>
- Bilgic, E., & Bayrakdar, İ. Ş. (2021). A new classification proposal for sphenoid sinus pneumatization: a retrospective radio-anatomic study. *Oral Radiology*, 37(1), 118–124. <https://doi.org/10.1007/s11282-020-00467-6>

- Blatt, S., & Michael, A. (2020). Bridging the gap in identification: Sella turcica bridging as a potential positive identification factor. *Forensic Imaging*, 21, 200384. <https://doi.org/10.1016/j.fri.2020.200384>
- Bolzan, J., & Tucunduva, M. (2012). ESTUDO RADIOGRÁFICO DA CAVIDADE NASAL E DOS SEIOS PARANASAIS E SUAS VARIAÇÕES. *Science in Health*, 3(1), 23–31.
- Bookstein, F. L. (1991). *Morphometric tools for landmark data: Geometry and biology*. Cambridge University Press.
- Borcard, D., Gillet, F., & Legendre, P. (2011). *Numerical Ecology with R*. Springer.
- Boyer, D. M., Puente, J., Gladman, J. T., Glynn, C., Mukherjee, S., Yapuncich, G. S., & Daubechies, I. (2015). A New Fully Automated Approach for Aligning and Comparing Shapes. *The Anatomical Record*, 298(1), 249–276. <https://doi.org/10.1002/AR.23084>
- Brogdon, B. G. (2011). Definitions in Forensics and Radiology. In M. J. Thali, M. D. Viner, & B. G. Brogdon (Eds.), *Brogdon's Forensic Radiology* (2a ed., pp. 3–7). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Cappella, A., Gibelli, D., Cellina, M., Mazzarelli, D., Oliva, A. G., De Angelis, D., Sforza, C., & Cattaneo, C. (2019). Three-dimensional analysis of sphenoid sinus uniqueness for assessing personal identification: a novel method based on 3D-3D superimposition. *International Journal of Legal Medicine*, 133(6), 1895–1901. <https://doi.org/10.1007/S00414-019-02139-5>
- Cardini, A. (2016). Lost in the Other Half: Improving Accuracy in Geometric Morphometric Analyses of One Side of Bilaterally Symmetric Structures. *Systematic Biology*, 65(6), 1096–1106. <https://doi.org/10.1093/sysbio/syw043>
- Cardini, A. (2017). Left, right or both? Estimating and improving accuracy of one-side-only geometric morphometric analyses of cranial variation. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 55(1), 1–10. <https://doi.org/10.1111/jzs.12144>
- Cardini, A. (2020). Less tautology, more biology? A comment on “high-density” morphometrics. *Zoomorphology*, 139(4), 513–529. <https://doi.org/10.1007/s00435-020-00499-w>

- Cardini, A., Seetah, K., & Barker, G. (2015). How many specimens do I need? Sampling error in geometric morphometrics: testing the sensitivity of means and variances in simple randomized selection experiments. *Zoomorphology*, *134*(2), 149–163. <https://doi.org/10.1007/s00435-015-0253-z>
- Carew, R. M., Morgan, R. M., & Rando, C. (2019). A Preliminary Investigation into the Accuracy of 3D Modeling and 3D Printing in Forensic Anthropology Evidence Reconstruction. *Journal of Forensic Sciences*, *64*(2), 342–352. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13917>
- Christensen, A. M., & Hatch, G. M. (2018). Advances in the Use of Frontal Sinuses for Human Identification. In K. E. Latham, E. J. Bartelink, & M. Finnegan (Eds.), *New Perspectives in Forensic Human Skeletal Identification* (pp. 227–240). Elsevier, Academic Press.
- Cohen, O., Warman, M., Fried, M., Shoffel-Havakuk, H., Adi, M., Halperin, D., & Lahav, Y. (2018). Volumetric analysis of the maxillary, sphenoid and frontal sinuses: A comparative computerized tomography based study. *Auris Nasus Larynx*, *45*(1), 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2017.03.003>
- Collyer, M. L., Sekora, D. J., & Adams, D. C. (2015). A method for analysis of phenotypic change for phenotypes described by high-dimensional data. *Heredity*, *115*(4), 357–365. <https://doi.org/10.1038/hdy.2014.75>
- Comisión Nacional de Búsqueda (CNB). (2021). *Contexto general*. <https://bit.ly/3laFI7m>
- Comité Internacional de la Cruz Roja (CICR). (2010). *PERSONAS DESAPARECIDAS, ANÁLISIS FORENSE DE ADN E IDENTIFICACIÓN DE RESTOS HUMANOS: Guía sobre prácticas idóneas en caso de conflicto armado y de otras situaciones de violencia armada* (2a ed.). Comité Internacional de la Cruz Roja. www.cicr.org
- Committee on Identifying the Needs of the Forensic Sciences Community (CINFSC), & National Research Council (NRC). (2009). *Strengthening Forensic Science in the United States: A Path Forward*. National Academy of Sciences.
- Coordinación General de Servicios Periciales (CGSP). (2012). *Desarrollo de los Servicios Periciales Federales*. Procuraduría General de la República (PGR), Coordinación General de Servicios Periciales (CGSP).

- Corder, G. W., & Foreman, D. I. (2014). *Nonparametric Statistics: A Step-by-Step Approach* (2a ed.). John Wiley & Sons.
- Dastidar, P., Heinonen, T., Numminen, J., Rautiainen, M., & Laasonen, E. (1999). Semi-automatic segmentation of computed tomographic images in volumetric estimation of nasal airway. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 256(4), 192–198. <https://doi.org/10.1007/s004050050138>
- Davis, J. C. (1986). *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons.
- de Mendonça, D. S., Ribeiro, E. C., de Barros Silva, P. G., Rodrigues, A. A., Kurita, L. M., de Aguiar, A. S. W., Tuji, F. M., Neves, F. S., Carvalho, F. S. R., & Costa, F. W. G. (2022). Diagnostic accuracy of paranasal sinus measurements on multislice computed tomography for sex estimation: A systematic review, meta-analysis, and meta-regression. *Journal of Forensic Sciences*, 67(6), 2151–2164. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15117>
- Decker, S. J., & Ford, J. M. (2019). Forensic personal identification utilizing part-to-part comparison of CT-derived 3D lumbar models. *Forensic Science International*, 294, 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.10.018>
- Degaga, T. K., Zenebe, A. M., Wirtu, A. T., Woldehawariat, T. D., Dellie, S. T., & Gemechu, J. M. (2020). Anatomographic Variants of Sphenoid Sinus in Ethiopian Population. *Diagnostics*, 10(11), 970. <https://doi.org/10.3390/DIAGNOSTICS10110970>
- Deloire, L., Diallo, I., Cadieu, R., Auffret, M., Alavi, Z., Ognard, J., & Ben Salem, D. (2019). Post-mortem X-ray computed tomography (PMCT) identification using ante-mortem CT-scan of the sphenoid sinus. *Journal of Neuroradiology*, 46(4), 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.neurad.2018.08.003>
- Denis, D. J. (2020). *Univariate, Bivariate, and Multivariate Statistics Using R: Quantitative Tools for Data Analysis and Data Science*. John Wiley & Sons.
- Denis, D. J. (2021). *Applied Univariate, Bivariate, and Multivariate Statistics: Understanding Statistics for Social and Natural Scientists, with Applications in SPSS and R* (2a ed.). John Wiley & Sons.
- Derrick, S. M., Hipp, J. A., Raxter, M. H., Love, J. C., Wiersema, J. M., Akella, N. S., Goel, P., & Sanchez, L. A. (2013). Testing a New Computer-Assisted Forensic

- Identification Method Developed Through Interdisciplinary Collaboration. *Physical Anthropology*.
- Dong, X., Fan, F., Wu, W., Wen, H., Chen, H., Zhang, K., Zhang, J., & Deng, Z. (2022). Forensic Identification from Three-Dimensional Sphenoid Sinus Images Using the Iterative Closest Point Algorithm. *Journal of Digital Imaging*, 35(4), 1034–1040. <https://doi.org/10.1007/s10278-021-00572-w>
- Drake, A. G., & Klingenberg, C. P. (2008). The pace of morphological change: historical transformation of skull shape in St Bernard dogs. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 275(1630), 71–76. <https://doi.org/10.1098/rspb.2007.1169>
- Dryden, I. L., & Mardia, K. V. (2016). *Statistical Shape Analysis with Applications in R* (2a ed.). John Wiley & Sons.
- Dudzik, B. (2019). Landmark and semilandmark data collection using digitizers and data processing. In N. Seguchi & B. Dudzik (Eds.), *3D Data Acquisition for Bioarchaeology, Forensic Anthropology, and Archaeology*. Elsevier, Academic Press.
- Durongbhan, P., Davey, C. E., & Stok, K. S. (2022). SPHARM-PDM based image preprocessing pipeline for quantitative morphometric analysis (QMA) for in situ joint assessment in rabbit and rat models. *Scientific Reports*, 12(1), 1113. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04542-8>
- Durrleman, S., Prastawa, M., Korenberg, J. R., Joshi, S., Trouvé, A., & Gerig, G. (2012). *Topology Preserving Atlas Construction from Shape Data without Correspondence Using Sparse Parameters* (pp. 223–230). https://doi.org/10.1007/978-3-642-33454-2_28
- Ege, Y. C., Foth, C., Baum, D., Wirkner, C. S., & Richter, S. (2020). Adapting spherical-harmonics-based geometric morphometrics (SPHARM) for 3D images containing large cavity openings using ambient occlusion: a study with hermit crab claw shape variability. *Zoomorphology*, 139(3), 421–432. <https://doi.org/10.1007/s00435-020-00488-z>
- Emirzeoglu, M., Sahin, B., Bilgic, S., Celebi, M., & Uzun, A. (2007). Volumetric evaluation of the paranasal sinuses in normal subjects using computer tomography images: A stereological study. *Auris Nasus Larynx*, 34(2), 191–195. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2006.09.003>

- Errickson, D., Grueso, I., Griffith, S. J., Setchell, J. M., Thompson, T. J. U., Thompson, C. E. L., & Gowland, R. L. (2017). Towards a Best Practice for the Use of Active Non-contact Surface Scanning to Record Human Skeletal Remains from Archaeological Contexts. *International Journal of Osteoarchaeology*, 27(4), 650–661. <https://doi.org/10.1002/oa.2587>
- Executive Office of the President’s Council of Advisors on Science and Technology. (2016). *REPORT TO THE PRESIDENT Forensic Science in Criminal Courts: Ensuring Scientific Validity of Feature-Comparison Methods*.
- Fedorov, A., Beichel, R., Kalpathy-Cramer, J., Finet, J., Fillion-Robin, J.-C., Pujol, S., Bauer, C., Jennings, D., Fennessy, F., Sonka, M., Buatti, J., Aylward, S., Miller, J. V., Pieper, S., & Kikinis, R. (2012). 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Magnetic Resonance Imaging*, 30(9), 1323–1341. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2012.05.001>
- Franklin, D., Swift, L., & Flavel, A. (2016). ‘Virtual anthropology’ and radiographic imaging in the Forensic Medical Sciences. *Egyptian Journal of Forensic Sciences*, 6(2), 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.ejfs.2016.05.011>
- Fruciano, C. (2016). Measurement error in geometric morphometrics. *Development Genes and Evolution*, 226(3), 139–158. <https://doi.org/10.1007/s00427-016-0537-4>
- Fujioka, M., & Young, L. W. (1978). The Sphenoidal Sinuses: Radiographic Patterns of Normal Development and Abnormal Findings in Infants and Children. *Radiology*, 129(1), 133–136. <https://doi.org/10.1148/129.1.133>
- Gao, T., Yapuncich, G. S., Daubechies, I., Mukherjee, S., & Boyer, D. M. (2018). Development and Assessment of Fully Automated and Globally Transitive Geometric Morphometric Methods, With Application to a Biological Comparative Dataset With High Interspecific Variation. *The Anatomical Record*, 301(4), 636–658. <https://doi.org/10.1002/ar.23700>
- Gaudio, D., Olivieri, L., De Angelis, D., Poppa, P., Galassi, A., & Cattaneo, C. (2016). Reliability of Craniofacial Superimposition Using Three-Dimension Skull Model. *Journal of Forensic Sciences*, 61(1), 5–11. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12856>
- Gibelli, D., Cellina, M., Gibelli, S., Cappella, A., Oliva, A. G., Termine, G., Dolci, C., & Sforza, C. (2019). Relationship between sphenoid sinus volume and protrusion of

- internal carotid artery and optic nerve: a 3D segmentation study on maxillofacial CT-scans. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 41(5), 507–512. <https://doi.org/10.1007/s00276-019-02207-w>
- Gibelli, D., Cellina, M., Gibelli, S., Oliva, A. G., Codari, M., Termine, G., & Sforza, C. (2017). Volumetric assessment of sphenoid sinuses through segmentation on CT scan. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 40(2), 193–198. <https://doi.org/10.1007/S00276-017-1949-1>
- Gibelli, D., Cellina, M., Gibelli, S., Oliva, A. G., Termine, G., & Sforza, C. (2017). Anatomical variants of sphenoid sinuses pneumatization: a CT scan study on a Northern Italian population. *La Radiologia Medica*, 122(8), 575–580. <https://doi.org/10.1007/S11547-017-0759-1>
- Glaunès, J. A., & Joshi, S. (2006, October). Template estimation from unlabeled point set data and surfaces for Computational Anatomy. *1st MICCAI Workshop on Mathematical Foundations of Computational Anatomy: Geometrical, Statistical and Registration Methods for Modeling Biological Shape Variability*.
- Gordon, G. M., & Steyn, M. (2012). An investigation into the accuracy and reliability of skull-photo superimposition in a South African sample. *Forensic Science International*, 216(1–3), 198.e1-198.e6. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.09.008>
- Goswami, A., Watanabe, A., Felice, R. N., Bardua, C., Fabre, A.-C., & Polly, P. D. (2019). High-Density Morphometric Analysis of Shape and Integration: The Good, the Bad, and the Not-Really-a-Problem. *Integrative and Comparative Biology*, 59(3), 669–683. <https://doi.org/10.1093/ICB/ICZ120>
- Göldner, C., Pistorius, S. M., Diogo, I., Bien, S., Sesterhenn, A., & Werner, J. A. (2012). Analysis of pneumatization and neurovascular structures of the sphenoid sinus using cone-beam tomography (CBT). *Acta Radiologica*, 53(2), 214–219. <https://doi.org/10.1258/ar.2011.110381>
- Guo, G., Ray, A., Izydorczak, M., Goldfeder, J., Lipson, H., & Xu, W. (2024). Unveiling intra-person fingerprint similarity via deep contrastive learning. *Science Advances*, 10(2). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adi0329>
- Hai-Yan, L., Zi-Yang, B., Wang, J., Xiao-Fang, Y., Tae-Geon, K., Ke-Ming, Y., Xiu-Ping, W., & Li, B. (2023). Application of Sphenoid Sinus Morphological Characteristics in

- Sex Estimation Based on Magnetic Resonance Imaging Images. *International Journal of Morphology*, 41(4), 1166–1170.
- Hammer, Ø. (2022). *PAST: PAleontological STatistics* (4.11). Natural History Museum, University of Oslo.
- Hammer, Ø. (2023). *PAST: PAleontological STatistics Version 4.13 Reference Manual*.
- Hewaidi, G., & Omami, G. (2008). Anatomic Variation of Sphenoid Sinus and Related Structures in Libyan Population: CT Scan Study. *Libyan Journal of Medicine*, 3(3), 128–133. <https://doi.org/10.4176/080307>
- Hewson, P. J. (2009). *Multivariate Statistics with R*. Paul Hewson.
- Hiremath, S. B., Gautam, A. A., Sheeja, K., & Benjamin, G. (2018). Assessment of variations in sphenoid sinus pneumatization in Indian population: A multidetector computed tomography study. *Indian Journal of Radiology and Imaging*, 28(3), 273–279. https://doi.org/10.4103/IJRI.IJRI_70_18/BIB
- Horstmann, M., Topham, A. T., Stamm, P., Kruppert, S., Colbourne, J. K., Tollrian, R., & Weiss, L. C. (2018). Scan, extract, wrap, compute—a 3D method to analyse morphological shape differences. *PeerJ*, 6, e4861. <https://doi.org/10.7717/peerj.4861>
- Hu, Y., Limaye, A., & Lu, J. (2020). Three-dimensional segmentation of computed tomography data using Drishti Paint: new tools and developments. *Royal Society Open Science*, 7(12), 201033. <https://doi.org/10.1098/rsos.201033>
- Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez. (2021). ADQUISICIÓN DE UNA UNIDAD PARA TOMOGRAFÍA AXIAL COMPUTARIZADA DE ALTA RESOLUCIÓN DE 256 O MÁS CORTES. In *LICITACIÓN PÚBLICA INTERNACIONAL ABIERTA ELECTRÓNICA* (LA-012NCA001-E866-2021). Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez.
- INTERPOL. (2018a). *Annexure 12: Methods of Identification*.
- INTERPOL. (2018b). *INTERPOL Disaster Victim Identification Guide*.
- INTERPOL Tsunami Evaluation Working Group. (2006). *INTERPOL Tsunami Evaluation Working Group*.
- Jackson, D. A. (1995). PROTEST: A PROcrustean Randomization TEST of community environment concordance. *Écoscience*, 2(3), 297–303. <https://doi.org/10.1080/11956860.1995.11682297>

- Jasso-Cuéllar, J., Gil-Chavarría, I., & Quinto-Sanchez, M. (2020). Anterior dental arch shape and human identification: Kieser *et al.* method applied to 2D-3D dental models in Mexican population. *Forensic Science International: Reports*, 2, 100161. <https://doi.org/10.1016/J.FSIR.2020.100161>
- Johnson, R., & Wichem, D. (2014). *Applied Multivariate Statistical Analysis* (6a ed.). Pearson.
- Kajoak, S. A., Ayad, C. E., Abdalla, E. A., Mohammed, M. N., Yousif, M. O., & Mohammed, A. M. (2013). Characterization of Sphenoid Sinuses for Sudanese Population Using Computed Tomography. *Global Journal of Health Science*, 6(1). <https://doi.org/10.5539/gjhs.v6n1p135>
- Kaplanoglu, H., Kaplanoglu, V., Toprak, U., & Hekimoglu, B. (2013). Surgical Measurement of the Sphenoid Sinus on Sagittal Reformatted CT in the Turkish Population. *The Eurasian Journal of Medicine*, 45(1), 7–15. <https://doi.org/10.5152/eajm.2013.02>
- Karakas, S., & Kavaklı, A. (2005). Morphometric examination of the paranasal sinuses and mastoid air cells using computed tomography. *Annals of Saudi Medicine*, 25(1), 41–45. <https://doi.org/10.5144/0256-4947.2005.41>
- Kaur, P., & Bawa, N. (2016). Evaluating the construction of phylogenetic tree using hierarchical clustering and bootstrapping. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 2(1), 22–26.
- Keast, A., Sofie, Y., Dawes, P., & Lyons, B. (2008). Anatomical variations of the paranasal sinuses in Polynesian and New Zealand European computerized tomography scans: *Otolaryngology–Head and Neck Surgery*, 139(2), 216–221. <https://doi.org/10.1016/J.OTOHNS.2008.05.014>
- Landi, F., & O’Higgins, P. (2019). Applying Geometric Morphometrics to Digital Reconstruction and Anatomical Investigation. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1171, 55–71. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24281-7_6
- Lee, D. H., Shin, J. H., & Lee, D. C. (2012). Three-dimensional morphometric analysis of paranasal sinuses and mastoid air cell system using computed tomography in pediatric population. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 76(11), 1642–1646. <https://doi.org/10.1016/J.IJPORL.2012.07.037>

- Lenardi, M. J., & Merwin, D. E. (2010). Towards Automating Artifact Analysis: A Study Showing Potential Applications of Computer Vision and Morphometrics to Artifact Typology. In A. M. T. Elewa (Ed.), *Morphometrics for Nonmorphometricians* (pp. 289–305). Springer Berlin Heidelberg.
- Li, Y., Xu, C., Yu, D., Xiong, T., Zhao, H., Xue, H., Liang, W. B., Deng, Z. H., & Zhang, L. (2021). Computer-aided superimposition of the frontal sinus via 3D reconstruction for comparative forensic identification. *International Journal of Legal Medicine*, *135*(5), 1993–2001. <https://doi.org/10.1007/s00414-021-02585-0>
- Lu, Y., Pan, J., Qi, S., Shi, J., Zhang, X., & Wu, K. (2011). Pneumatization of the sphenoid sinus in Chinese: the differences from Caucasian and its application in the extended transsphenoidal approach. *Journal of Anatomy*, *219*(2), 132–142. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2011.01380.x>
- M, S., Bagewadi, A., Lagali-Jirge, V., S, L. K., Panwar, A., & Keluskar, V. (2022). Reliability of gender determination from paranasal sinuses and its application in forensic identification-a systematic review and meta-analysis. *Forensic Science, Medicine and Pathology*. <https://doi.org/10.1007/s12024-022-00520-2>
- Mantel, N., & Valand, R. S. (1970). A Technique of Nonparametric Multivariate Analysis. *Biometrics*, *26*(3), 547. <https://doi.org/10.2307/2529108>
- Manthey, L., & Ousley, S. D. (2020). Geometric morphometrics. In Z. Obertová, A. Stewart, & C. Cattaneo (Eds.), *Statistics and Probability in Forensic Anthropology* (pp. 289–298). Elsevier, Academic Press.
- Mardia, K. V., Kent, J. T., & Bibby, J. M. (1979). *Multivariate Analysis*. Academic Press.
- Márquez, S. (2008). The Paranasal Sinuses: The Last Frontier in Craniofacial Biology. *The Anatomical Record: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology*, *291*(11), 1350–1361. <https://doi.org/10.1002/ar.20791>
- Maxwell, A. B., Ross, A. H., & Simmons, S. (2012). A Radiographic Study on the Utility of Cranial Vault Outlines for Positive Identifications. *Physical Anthropology*.
- Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto, & Comité Internacional de la Cruz Roja (CICR). (2015). *Guía de Buenas Prácticas para el Uso de la Genética Forense en Investigaciones sobre derechos humanos y derecho internacional humanitario*.

- Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto, & Comité Internacional de la Cruz Roja (CICR). (2021). *Directrices para el uso de la genética forense en investigaciones sobre Derechos Humanos y derecho internacional humanitario*.
- Mohebbi, A., Rajaeih, S., Safdarian, M., & Omidian, P. (2017). The sphenoid sinus, foramen rotundum and vidian canal: a radiological study of anatomical relationships. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 83(4), 381–387. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2016.04.013>
- Mokhasanavisu, V. J. P., Singh, R., Balakrishnan, R., & Kadavigere, R. (2019). Ethnic Variation of Sinonasal Anatomy on CT Scan and Volumetric Analysis. *Indian Journal of Otolaryngology and Head & Neck Surgery*, 71(S3), 2157–2164. <https://doi.org/10.1007/s12070-019-01600-6>
- Movimiento por nuestros Desaparecidos en México. (2021). *La Crisis Forense en México: Más de 52,000 personas fallecidas sin identificar*. <https://bit.ly/3p3xiQp>
- Nejaim, Y., Farias Gomes, A., Valadares, C. V., Costa, E. D., Peroni, L. V., Groppo, F. C., & Haiter-Neto, F. (2019). Evaluation of volume of the sphenoid sinus according to sex, facial type, skeletal class, and presence of a septum: a cone-beam computed tomographic study. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 57(4), 336–340. <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2018.12.017>
- Öksüzler, F. Y., Polat, S., Öksüzler, M., Uygur, A. G., & Yücel, A. H. (2019). The Determination of Sphenoid Sinus Dimensions in Turkish Healthy Adult Subjects: An MRI Study. *International Journal of Morphology*, 37(1), 22–27. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022019000100022>
- Oliveira, J. M. M., Alonso, M. B. C. C., Tucunduva, M. J. A. P. de S. e, Fuziy, A., Scocate, A. C. R. N., & Costa, A. L. F. (2016). Volumetric study of sphenoid sinuses: anatomical analysis in helical computed tomography. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 39(4), 367–374. <https://doi.org/10.1007/S00276-016-1743-5>
- Oliveira, J. X., Perrella, A., Santos, K. C. P., Sales, M. A. O., & Cavalcanti, M. G. P. (2009). Accuracy assessment of human sphenoidal sinus volume and area measure and its relationship with sexual dimorphism using the 3D-CT. *Rev Inst Ciênc Saúde*, 27(4), 390–393.

- Omari, R., Hunt, C., Coumbaros, J., & Chapman, B. (2020). Virtual anthropology? Reliability of three-dimensional photogrammetry as a forensic anthropology measurement and documentation technique. *International Journal of Legal Medicine*, 135(3), 939–950. <https://doi.org/10.1007/S00414-020-02473-Z>
- Onwuchekwa, R. C., & Alazigha, N. (2017). Computed tomography anatomy of the paranasal sinuses and anatomical variants of clinical relevants in Nigerian adults. *Egyptian Journal of Ear, Nose, Throat and Allied Sciences*, 18(1), 31–38. <https://doi.org/10.1016/J.EJENTA.2016.11.001>
- Özer, C. M., Atalar, K., Öz, I. I., Toprak, S., & Barut, Ç. (2018). Sphenoid Sinus in Relation to Age, Gender, and Cephalometric Indices. *Journal of Craniofacial Surgery*, 29(8), 2319–2326. <https://doi.org/10.1097/SCS.0000000000004869>
- Palamenghi, A., De Angelis, D., Cellina, M., Sforza, C., Cattaneo, C., & Gibelli, D. (2021). Does the choice of the reference model affect the results of 3D-3D superimposition procedure? A comparison of different protocols for personal identification. *International Journal of Legal Medicine*, 135(5), 1879–1886. <https://doi.org/10.1007/s00414-021-02550-x>
- Pan, L., Wei, D., & Wu, X. (2014). Latitudinal and climatic distributions of 3D craniofacial features among Holocene populations. *Science China Earth Sciences*, 57(7), 1692–1700. <https://doi.org/10.1007/s11430-014-4850-3>
- Paniagua, B., Bompard, L., Cates, J., Whitaker, R., Datar, M., Vachet, C., & Styner, M. (2012). *Combined SPHARM-PDM and entropy-based particle systems shape analysis framework*. 83170L. <https://doi.org/10.1117/12.911228>
- Park, I. H., Song, J. S., Choi, H., Kim, T. H., Hoon, S., Lee, S. H., & Lee, H. M. (2010). Volumetric study in the development of paranasal sinuses by CT imaging in Asian: A Pilot study. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 74(12), 1347–1350. <https://doi.org/10.1016/J.IJPORL.2010.08.018>
- Pascal, L., Perdomo, J., Styner, M., Shah, H., & Paniagua, B. (2022). *Spherical Harmonic Representation Point Distribution Models (SPHARM-PDM)*.
- Penning, R., Riepert, T., Buhmann, D., & Ritz-Timme, S. (2003). Identifikation und forensische Osteologie. In B. Madea & B. Brinkmann (Eds.), *Handbuch gerichtliche Medizin: Band 2* (pp. 1117–1270). Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003.

- Peres-Neto, P. R., & Jackson, D. A. (2001). How well do multivariate data sets match? The advantages of a Procrustean superimposition approach over the Mantel test. *Oecologia*, *129*(2), 169–178. <https://doi.org/10.1007/s004420100720>
- Piazzese, C., Carminati, C. M., Pepi, M., & Caiani, E. G. (2017). Statistical Shape Models of the Heart: Applications to Cardiac Imaging. In G. Zheng, S. Li, & G. Székely (Eds.), *Statistical Shape and Deformation Analysis: Methods, Implementations and Applications* (pp. 445–480). Elsevier, Academic Press.
- Pigliucci, M. (2001). *Phenotypic Plasticity: Beyond Nature and Nurture*. The Johns Hopkins University Press.
- Pigliucci, M., & Preston, K. (Eds.). (2004). *Phenotypic Integration: Studying the Ecology and Evolution of Complex Phenotypes*. Oxford University Press.
- Pirinc, B., Fazliogullari, Z., Guler, I., Unver Dogan, N., Uysal, I. I., & Karabulut, A. K. (2019). Classification and volumetric study of the sphenoid sinus on MDCT images. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, *276*(10), 2887–2894. <https://doi.org/10.1007/s00405-019-05549-8>
- Pirner, S., Tingelhoff, K., Wagner, I., Westphal, R., Rilk, M., Wahl, F. M., Bootz, F., & Eichhorn, K. W. G. (2009). CT-based manual segmentation and evaluation of paranasal sinuses. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, *266*(4), 507–518. <https://doi.org/10.1007/s00405-008-0777-7>
- Pomidor, B. J., Makedonska, J., & Slice, D. E. (2016). A Landmark-Free Method for Three-Dimensional Shape Analysis. *PLOS ONE*, *11*(3), e0150368. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150368>
- Porto, A., Rolfe, S., & Maga, A. M. (2021). ALPACA: A fast and accurate computer vision approach for automated landmarking of three-dimensional biological structures. *Methods in Ecology and Evolution*, *12*(11), 2129–2144. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13689>
- Procuraduría General de la República (PGR). (2015a). *Guía de Especialidades Periciales Federales*. Procuraduría General de la República (PGR).
- Procuraduría General de la República (PGR). (2015b). *Protocolo para el Tratamiento e Identificación Forense*. Procuraduría General de la República (PGR).

- Quinto Sánchez, M. (2022). Guía para la valoración judicial de la prueba pericial en materia de identificación humana. In L. Escobar Lucrecio & S. A. Pérez Avilés (Eds.), *Guías para la valoración judicial de la prueba pericial en materia de identificación humana, odontología forense, psicología forense, análisis de video digital, balística, medicina forense, criminalística de campo: Vol. II* (pp. 17–49). Departamento de Justicia de los Estados Unidos de América, Office of Overseas Prosecutorial Development, Assistance and Training (OPDAT), Consejo de la Judicatura Federal (CJF), Licenciatura en Ciencia Forense, Facultad de Medicina, UNAM, Ubijus.
- R Core Team. (2023). *R* (4.2.2). The R Foundation.
- Rajagopal, Thakar, S., Hegde, V., Aryan, S., & Hegde, A. S. (2020). Morphometric Alterations of the Sphenoid Ostium and other Landmarks in Acromegaly: Anatomical Considerations and Implications in Endoscopic Pituitary Surgery. *Neurology India*, 68(3), 578. <https://doi.org/10.4103/0028-3886.288996>
- Ramos, B. C., Manzi, F. R., & Vespasiano, A. I. (2021). Volumetric and linear evaluation of the sphenoidal sinus of a Brazilian population, in cone beam computed tomography. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 77, 102097. <https://doi.org/10.1016/J.JFLM.2020.102097>
- Reredy, S. K., Johnson, D. M., & Wise, S. K. (2014). Markers of Increased Aeration in the Paranasal Sinuses and Along the Skull Base: Association between Anatomic Variants. *American Journal of Rhinology & Allergy*, 28(6), 477–482. <https://doi.org/10.2500/ajra.2014.28.4086>
- Robles, M., Carew, R. M., Morgan, R. M., & Rando, C. (2020). A step-by-step method for producing 3D crania models from CT data. *Forensic Imaging*, 23, 200404. <https://doi.org/10.1016/J.FRI.2020.200404>
- Robles, M., Morgan, R. M., & Rando, C. (2020). A novel method for producing 3D models of paranasal sinuses for forensic anthropology applications. *Australian Journal of Forensic Sciences*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/00450618.2020.1766113>
- Robles, M., Rando, C., & Morgan, R. M. (2020). The utility of three-dimensional models of paranasal sinuses to establish age, sex, and ancestry across three modern populations: A preliminary study. *Australian Journal of Forensic Sciences*. <https://doi.org/10.1080/00450618.2020.1805014>

- Rolfe, S., Davis, C., & Maga, A. M. (2021). Comparing semi-landmarking approaches for analyzing three-dimensional cranial morphology. *American Journal of Physical Anthropology*, *175*(1), 227–237. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24214>
- Rolfe, S., Pieper, S., Porto, A., Diamond, K., Winchester, J., Shan, S., Kirveslahti, H., Boyer, D., Summers, A., & Maga, A. M. (2021). SlicerMorph: An open and extensible platform to retrieve, visualize and analyse 3D morphology. *Methods in Ecology and Evolution*, *12*(10), 1816–1825. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13669>
- Roy, D., Lucek, K., Bühler, E., & Seehausen, O. (2010). Correlating Shape Variation with Feeding Performance to Test for Adaptive Divergence in Recently Invading Stickleback Populations from Swiss peri-alpine Environments. In A. M. T. Elewa (Ed.), *Morphometrics for Nonmorphometricians* (pp. 233–257). Springer Berlin Heidelberg.
- Salah, Z., Bartz, D., Dammann, F., Schwaderer, E., Maassen, M. M., & Straßer, W. (2005). A Fast and Accurate Approach for the Segmentation of the Paranasal Sinus. In *Bildverarbeitung für die Medizin 2005* (pp. 93–97). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/3-540-26431-0_20
- Sarria, R. C., Canata, C. M., Lezcano, N., & Martínez, E. (2008). Radiología Forense: Tomografía Computada de senos paranasales como método para identificar a las personas. *Anales de La Facultad de Ciencias Médicas (Asunción)*, *41*(1–2), 43–49.
- Schweizerische Gesellschaft für Rechtsmedizin SGRM. (2017). *Forensische Verfahren zur Identifizierung unbekannter Personen*. <https://sgrm.ch/de/forensische-medizin/arbeitsgruppen/qm-forensische-medizin>
- Schwerzmann, M. C., Suter, V. G. A., & von Arx, T. (2022). The anatomical variability of the sphenoid sinus in CBCT - a retrospective study. *SWISS DENTAL JOURNAL*, *132*(1), 10–17.
- Acuerdo SNBP/002/2020 por el que se aprueba el Protocolo Homologado para la Búsqueda de Personas Desaparecidas y No Localizadas, el cual se anexa al presente Acuerdo y forma parte integrante del mismo, (2020). <https://bit.ly/3rjBcau>
- Selcuk, O. T., Erol, B., Renda, L., Osma, U., Eyigor, H., Gunsoy, B., Yagci, B., & Yilmaz, D. (2015). Do altitude and climate affect paranasal sinus volume? *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, *43*(7), 1059–1064. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2015.05.013>

- Sergi, V., Ferreira, M., Teixeira, C., & Silva, M. (2020). ESTUDO VOLUMÉTRICO DO SEIO ESFENOIDAL EM TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE FEIXE CÔNICO. 29° Encontro Anual de Iniciação Científica (EAIC), 9° Encontro Anual de Iniciação Científica Júnior (EAICJR). <http://www.eaic.uem.br/eaic2020/portal/index.php?op=trabalhos&pagina=41>
- Sevinc, O., Is, M., Barut, C., & Erdogan, A. (2014). Anatomic Variations of Sphenoid Sinus Pneumatization in a Sample of Turkish Population: MRI Study. *International Journal of Morphology*, 32(4), 1140–1143. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022014000400003>
- Sherif, N. A. E.-H., Sheta, A. A. E.-M., Ibrahim, M. E., Kaka, R. A. E.-M., & Henaidy, M. F. (2017). Evaluation of the paranasal sinuses dimensions in sex estimation among a sample of adult egyptians using multidetector computed tomography. *Journal of Forensic Radiology and Imaging*, 11, 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.jofri.2017.11.001>
- Sheskin, D. J. (2011). *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures* (5a ed.). Chapman & Hall/CRC, Taylor & Francis Group.
- Sheta, A. A. E.-M., Henaidy, M. F., Ibrahim, M. E., Sherif, N. A. E.-H., & Kaka, R. A. E.-M. (2017). Evaluation of the paranasal sinuses dimensions in sex estimation among a sample of adult egyptians using multidetector computed tomography. *Journal of Forensic Radiology and Imaging*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.jofri.2017.11.001>
- Silvester, C. M., & Hillson, S. (2020). A critical assessment of the potential for Structure-from-Motion photogrammetry to produce high fidelity 3D dental models. *American Journal of Physical Anthropology*, 173(2), 381–392. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24109>
- Singh, N., & Rajamani, D. (1996). *Cellular Manufacturing Systems*. Chapman & Hall.
- Singh, P., Hung, K., Ajmera, D. H., Yeung, A. W. K., von Arx, T., & Bornstein, M. M. (2021). Morphometric characteristics of the sphenoid sinus and potential influencing factors: a retrospective assessment using cone beam computed tomography (CBCT). *Anatomical Science International*, 96(4), 544–555. <https://doi.org/10.1007/s12565-021-00622-x>

- Souadih, K., Belaid, A., Ben Salem, D., & Conze, P.-H. (2020). Automatic forensic identification using 3D sphenoid sinus segmentation and deep characterization. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 58(2), 291–306. <https://doi.org/10.1007/s11517-019-02050-6>
- Strauss, R. E. (2010). Discriminating Groups of Organisms. In A. M. T. Elewa (Ed.), *Morphometrics for Nonmorphometricians* (pp. 73–91). Springer Berlin Heidelberg.
- Styner, M., Oguz, I., Xu, S., Brechbühler, C., Pantazis, D., Levitt, J. J., Shenton, M. E., & Gerig, G. (2006). Framework for the Statistical Shape Analysis of Brain Structures using SPHARM-PDM. *Insight J.*, 1071, 242–250.
- Tan, P.-N., Steinbach, M., & Kumar, V. (2014). *Introduction to Data Mining*. Pearson.
- Thomas, O. O., Shen, H., Raaum, R. L., Harcourt-Smith, W. E. H., Polk, J. D., & Hasegawa-Johnson, M. (2023). Automated morphological phenotyping using learned shape descriptors and functional maps: A novel approach to geometric morphometrics. *PLOS Computational Biology*, 19(1), e1009061. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009061>
- Tingelhoff, K., Moral, A. I., Kunkel, M. E., Rilk, M., Wagner, I., Eichhorn, K. W. G., Wahl, F. M., & Bootz, F. (2007). Comparison between Manual and Semi-automatic Segmentation of Nasal Cavity and Paranasal Sinuses from CT Images. *2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 5505–5508. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4353592>
- Tortora, G. J., & Derrickson, B. (2020). *Principles of Anatomy and Physiology* (16a ed.). John Wiley & Sons.
- Toussaint, N., Redhead, Y., Vidal-García, M., Lo Vercio, L., Liu, W., Fisher, E. M. C., Hallgrímsson, B., Tybulewicz, V. L. J., Schnabel, J. A., & Green, J. B. A. (2021). A landmark-free morphometrics pipeline for high-resolution phenotyping: application to a mouse model of Down syndrome. *Development*, 148(18). <https://doi.org/10.1242/dev.188631>
- Treviño-Gonzalez, J. L., Maldonado-Chapa, F., Becerra-Jimenez, J. A., Soto-Galindo, G. A., & Angel, J. A. M. (2021). Sphenoid Sinus: Pneumatization and Septation Patterns in a Hispanic Population. *ORL*, 83(5), 362–371. <https://doi.org/10.1159/000514458>

- Tsaklakidis, A. (2022). Imaging Methods. In F. Dedouit, K. Yen, & S. Heinze (Eds.), *Forensic Imaging: A Practical Guide* (pp. 9–18). Springer.
- Tuang, G. J., Zahedi, F. D., Husain, S., Hamizan, A. K. W., Kew, T. Y., & Thanabalan, J. (2023). Volumetric evaluation of the sphenoid sinus among different races in the Southeast Asian (SEA) population: a computerized tomography study. *International Journal of Medical Sciences*, 20(2), 211–218. <https://doi.org/10.7150/ijms.68095>
- Vaid, S., & Vaid, N. (2015). Normal Anatomy and Anatomic Variants of the Paranasal Sinuses on Computed Tomography. *Neuroimaging Clinics of North America*, 25(4), 527–548. <https://doi.org/10.1016/j.nic.2015.07.002>
- Vaillant, M., & Glaunès, J. (2005). *Surface Matching via Currents* (pp. 381–392). https://doi.org/10.1007/11505730_32
- Velazquez, E. R., Parmar, C., Jermoumi, M., Mak, R. H., van Baardwijk, A., Fennessy, F. M., Lewis, J. H., De Ruyscher, D., Kikinis, R., Lambin, P., & Aerts, H. J. W. L. (2013). Volumetric CT-based segmentation of NSCLC using 3D-Slicer. *Scientific Reports*, 3(1), 3529. <https://doi.org/10.1038/srep03529>
- Vicory, J., Pascal, L., Hernandez, P., Fishbaugh, J., Prieto, J., Mostapha, M., Huang, C., Shah, H., Hong, J., Liu, Z., Michoud, L., Fillion-Robin, J.-C., Gerig, G., Zhu, H., Pizer, S. M., Styner, M., & Paniagua, B. (2018). *SlicerSALT: Shape AnaLysis Toolbox* (pp. 65–72). https://doi.org/10.1007/978-3-030-04747-4_6
- Vitek, N. S., Manz, C. L., Gao, T., Bloch, J. I., Strait, S. G., & Boyer, D. M. (2017). Semi-supervised determination of pseudocryptic morphotypes using observer-free characterizations of anatomical alignment and shape. *Ecology and Evolution*, 7(14), 5041–5055. <https://doi.org/10.1002/ece3.3058>
- Wallner, J., Schwaiger, M., Hochegger, K., Gsaxner, C., Zemann, W., & Egger, J. (2019). A review on multiplatform evaluations of semi-automatic open-source based image segmentation for cranio-maxillofacial surgery. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 182, 105102. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2019.105102>
- Wang, J., Bidari, S., Inoue, K., Yang, H., & Rhoton, A. (2010). Extensions of the Sphenoid Sinus: A New Classification. *Neurosurgery*, 66(4), 797–816. <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000367619.24800.B1>

- Wanzeler, A. M. V., Alves-Júnior, S. M., Ayres, L., da Costa Prestes, M. C., Gomes, J. T., & Tuji, F. M. (2019). Sex estimation using paranasal sinus discriminant analysis: a new approach via cone beam computerized tomography volume analysis. *International Journal of Legal Medicine*, *133*(6), 1977–1984. <https://doi.org/10.1007/s00414-019-02100-6>
- Watanabe, A. (2018). How many landmarks are enough to characterize shape and size variation? *PLOS ONE*, *13*(6), e0198341. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0198341>
- Watson, J. M. S. (2019). Positive Identification Via Frontal Sinus Morphology: A Geographic Information Systems (GIS) Approach. *Anthropology*, *104*.
- Weber, G. W. (2014). Another link between archaeology and anthropology: Virtual anthropology. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, *1*(1), 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2013.04.001>
- Weber, G. W., & Bookstein, F. L. (2011). *Virtual Anthropology: A guide to a new interdisciplinary field*. SpringerWienNewYork.
- Weber, G. W., Schäfer, K., Prossinger, H., Gunz, P., Mitteröcker, P., & Seidler, H. (2001). Virtual Anthropology: The Digital Evolution in Anthropological Sciences. *Journal of PHYSIOLOGICAL ANTHROPOLOGY and Applied Human Science*, *20*(2), 69–80. <https://doi.org/10.2114/JPA.20.69>
- Wei, L.-F., Zhang, J., Chen, H.-J., & Wang, R. (2013). Value of anatomical landmarks in single-nostril endonasal transnasal-sphenoidal surgery. *Experimental and Therapeutic Medicine*, *5*(4), 1057–1062. <https://doi.org/10.3892/ETM.2013.936>
- Wen, H., Wu, W., Fan, F., Liao, P., Chen, H., Zhang, Y., Deng, Z., & Lv, W. (2022). Human identification performed with skull's sphenoid sinus based on deep learning. *International Journal of Legal Medicine*, *136*(4), 1067–1074. <https://doi.org/10.1007/s00414-021-02761-2>
- Wu, P., Zeng, H., Tan, X., Ouyang, J., & Zhong, S. (2015). A novel method to locate intracranial anatomic landmarks of sella using three-dimensional computed tomography reconstruction images for endoscopic endonasal transsphenoidal surgery. *Journal of Craniofacial Surgery*, *26*(7), 2184–2186. <https://doi.org/10.1097/SCS.0000000000001944>

- Yonetsu, K., Watanabe, M., & Nakamura, T. (2000). Age-Related Expansion and Reduction in Aeration of the Sphenoid Sinus: Volume Assessment by Helical CT Scanning. *American Journal of Neuroradiology*, *21*(1), 179–182.
- Zappa, E., & Mazzoleni, P. (2010). Reliability of personal identification base on optical 3D measurement of a few facial landmarks. *Procedia Computer Science*, *1*(1), 2769–2777. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2010.04.311>
- Zelditch, M. L., Swiderski, D. L., & Sheets, H. D. (2012). *Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer* (2a ed.). Elsevier, Academic Press.
- Zelditch, M. L., Swiderski, D. L., Sheets, H. D., & Fink, W. L. (2004). *Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer*. Elsevier, Academic Press.
- Zelterman, D. (2015). *Applied Multivariate Statistics with R*. Springer.

Anexos

Gráficos desglosados de los análisis de conglomerados (CA)

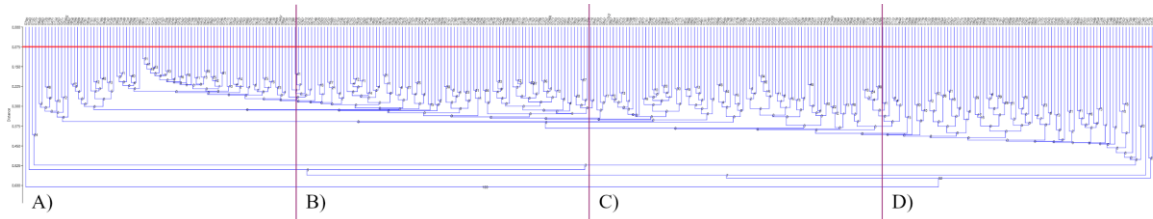


Figura 86. Clúster de los individuos sin repeticiones por el método ALPACA, la línea roja se trazó en el valor de corte mínimo de distancia a 0.075. El dendrograma se dividió en cuatro partes (A, B, C y D) para facilitar la visualización.

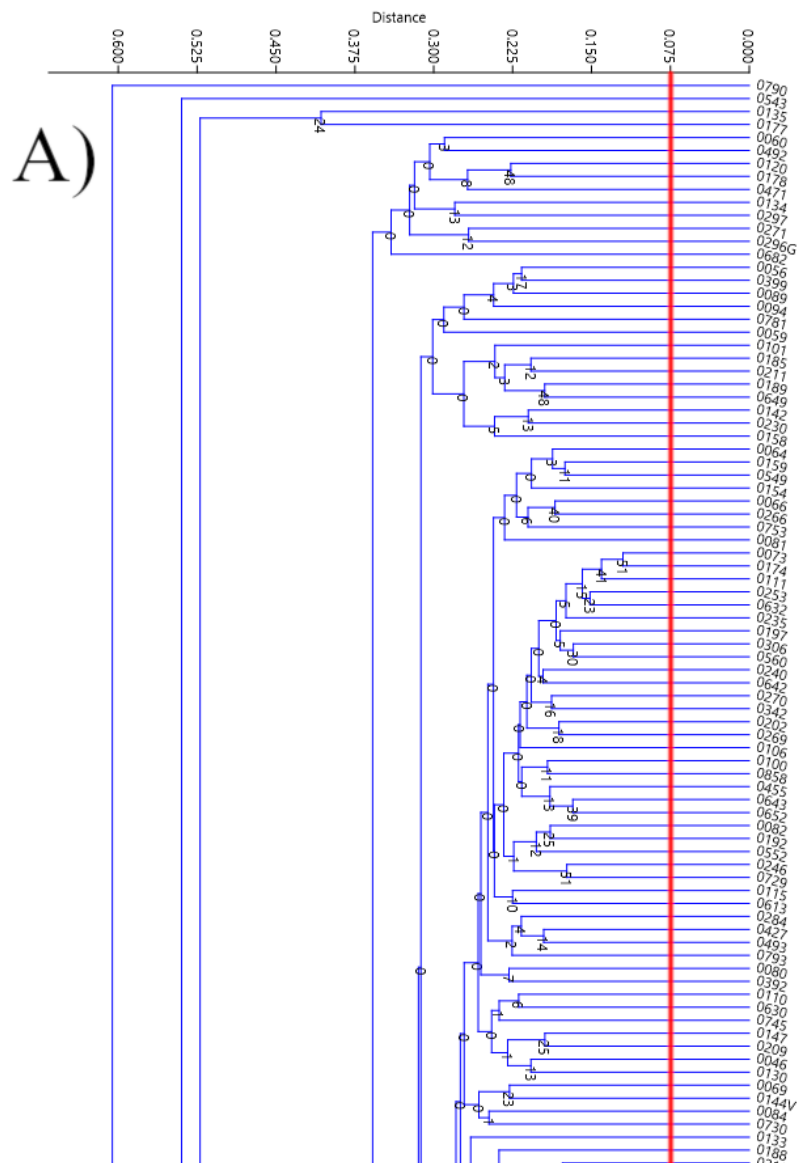


Figura 87. Parte A del clúster de individuos sin repeticiones por el método ALPACA. Individuo 0790 a10218.

B)

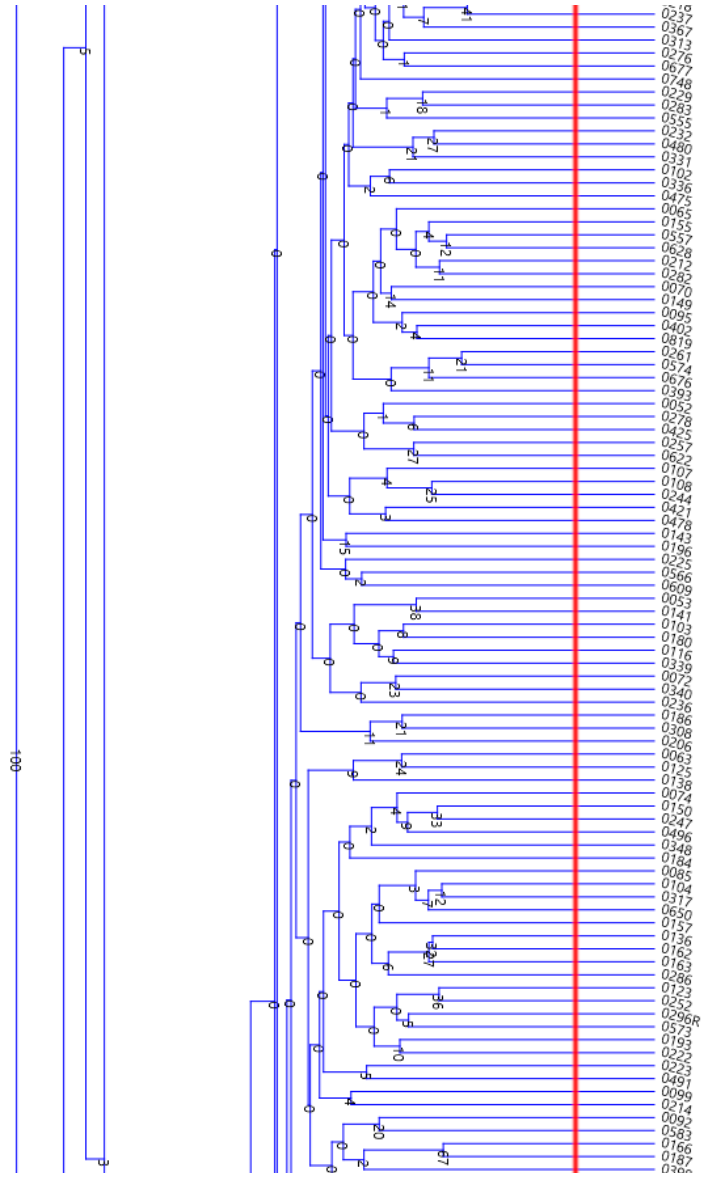


Figura 88. Parte B del clúster de individuos sin repeticiones por el método ALPACA. Individuo 0237 a10398.

C)

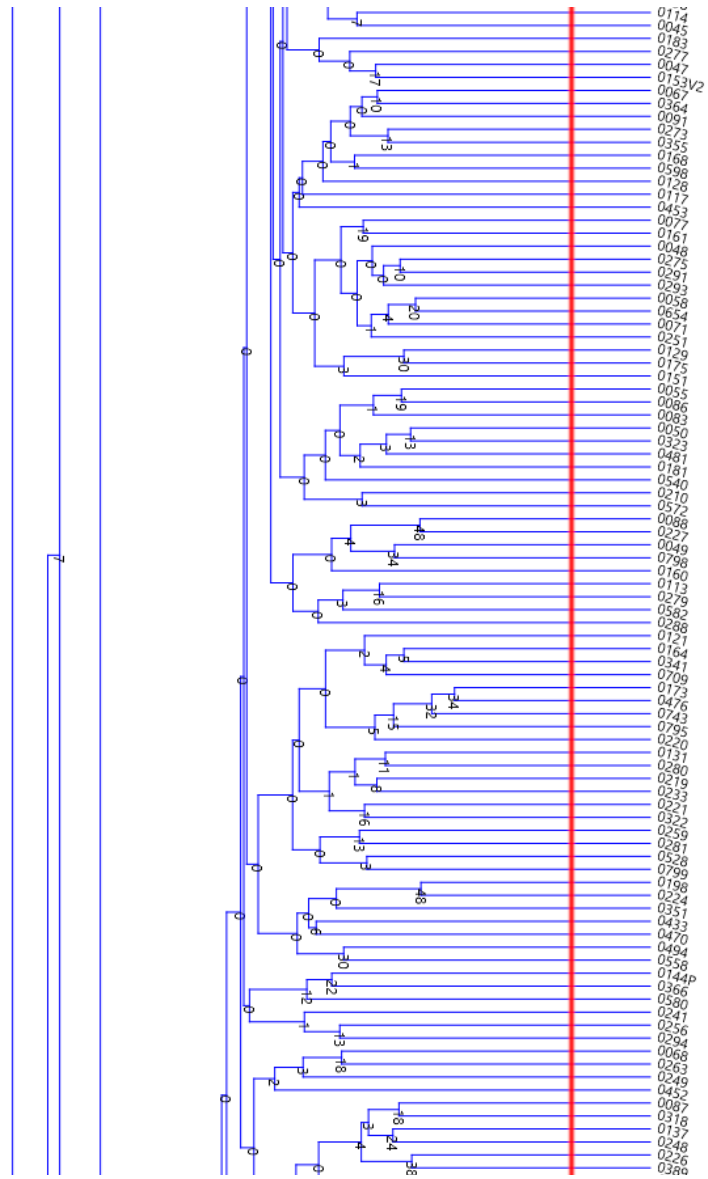


Figura 89. Parte C del clúster de individuos sin repeticiones por el método ALPACA. Individuo 0114 al 0389.

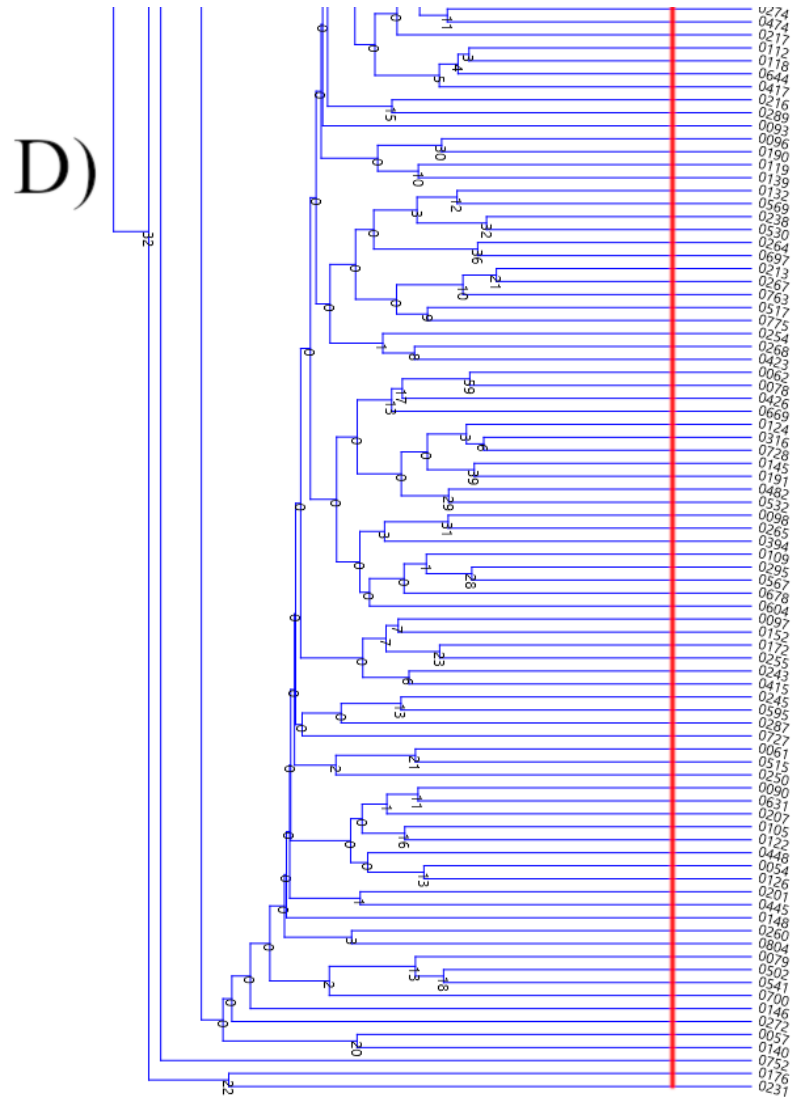


Figura 90. Parte D del clúster de individuos sin repeticiones por el método ALPACA. Individuo 0274 al 0231.

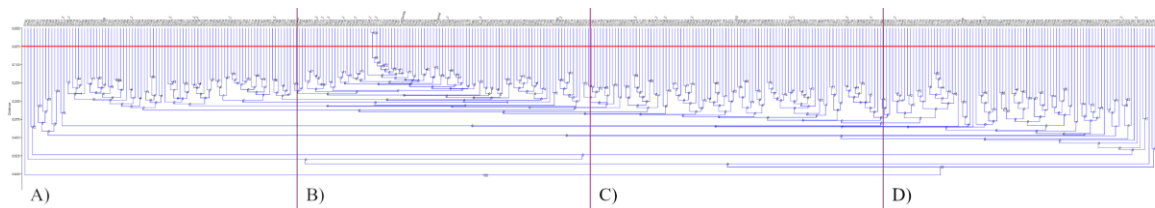


Figura 91. Clúster de los individuos con repeticiones por el método ALPACA, la línea roja se trazó en el valor de corte mínimo de distancia a 0.075. El dendograma se dividió en cuatro partes (A, B, C y D) para facilitar la visualización.

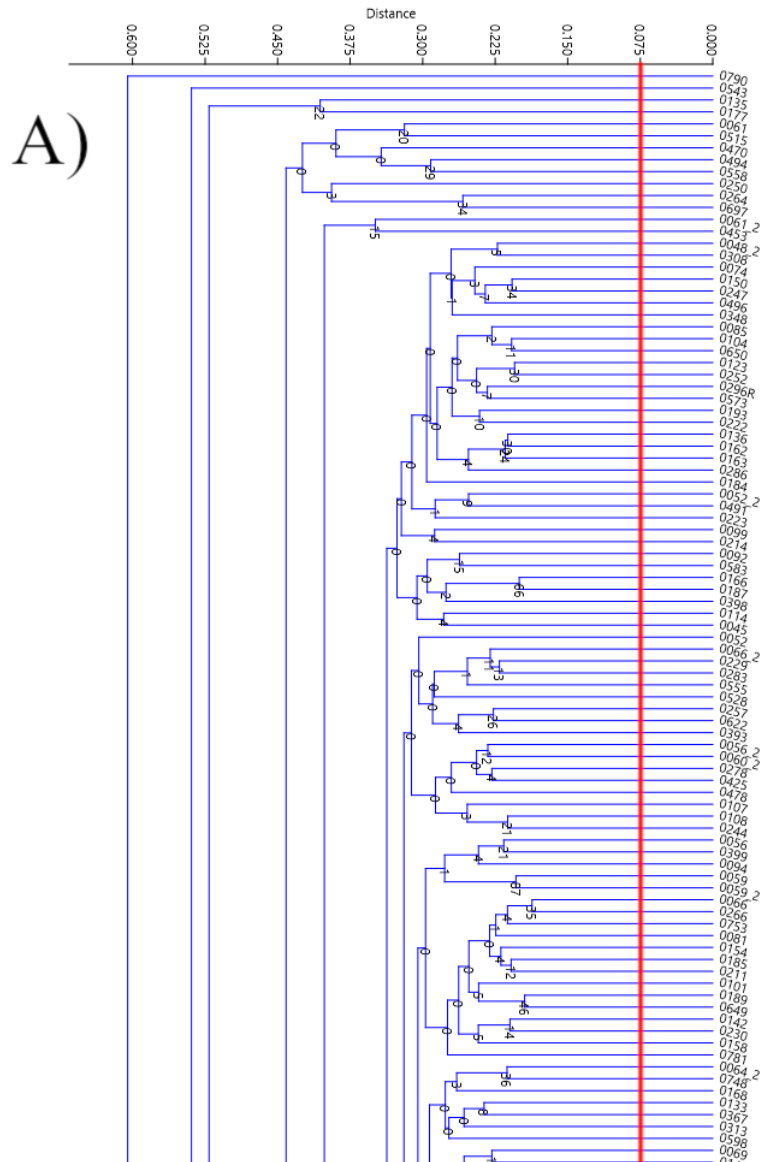


Figura 92. Parte A del clúster de individuos con repeticiones por el método ALPACA. Individuo 0790 al 144V.

B)

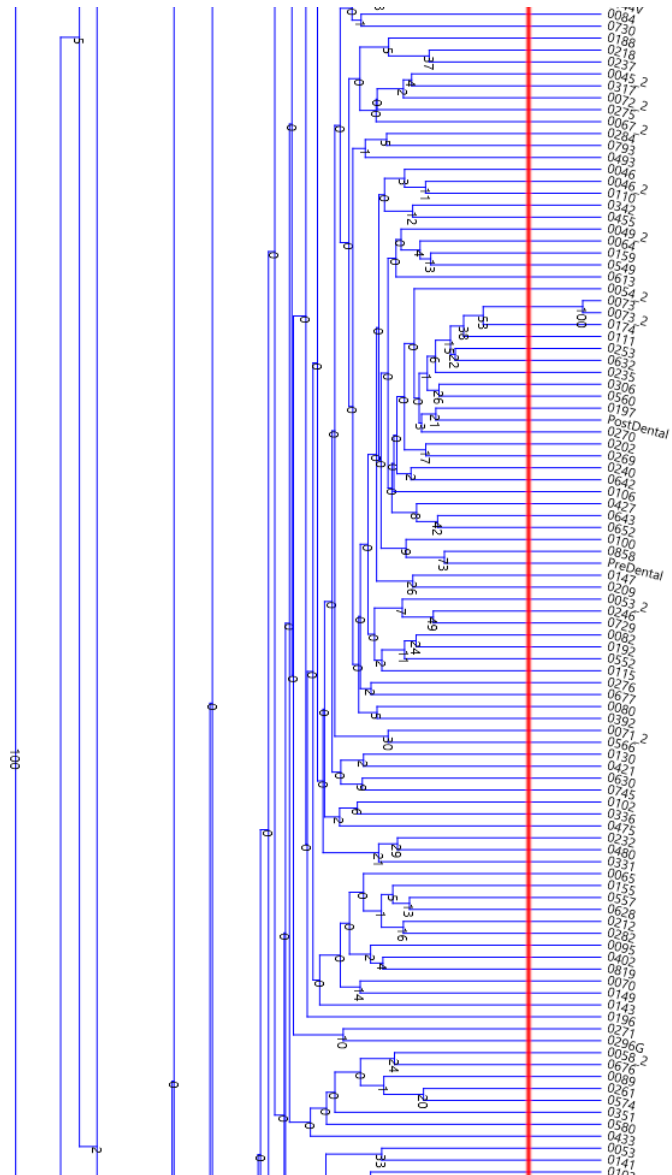


Figura 93. Parte B del clúster de individuos con repeticiones por el método ALPACA. Individuo 0084 al 0103.

C)

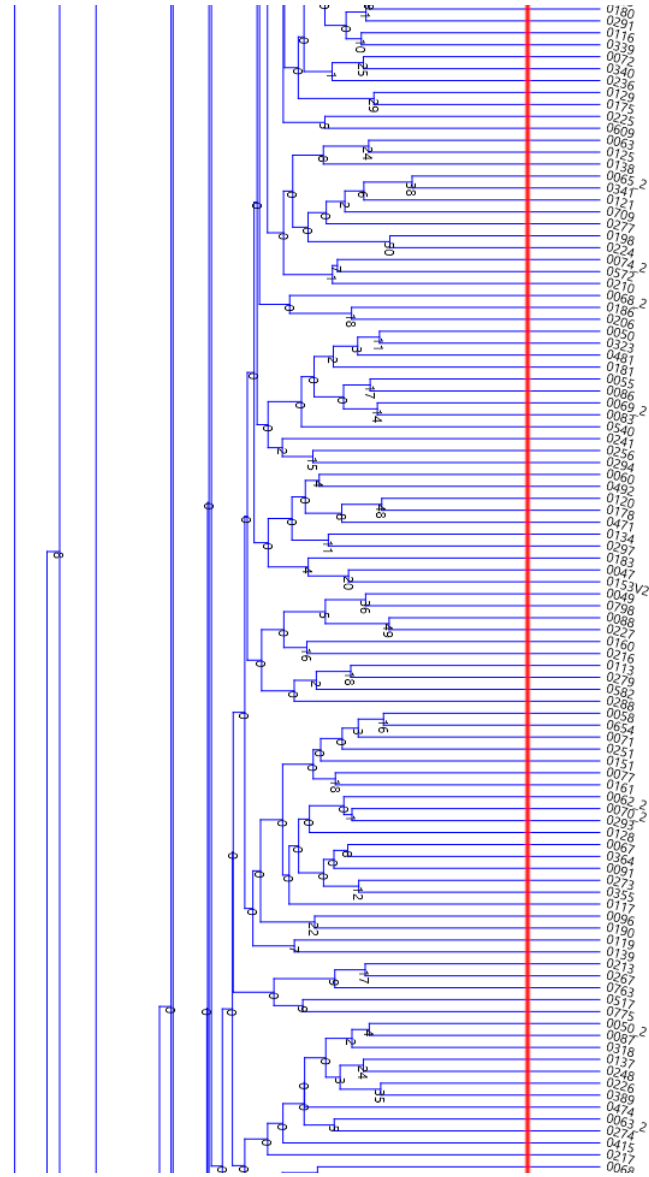


Figura 94. Parte C del clúster de individuos con repeticiones por el método ALPACA. Individuo 0180 al 0068.

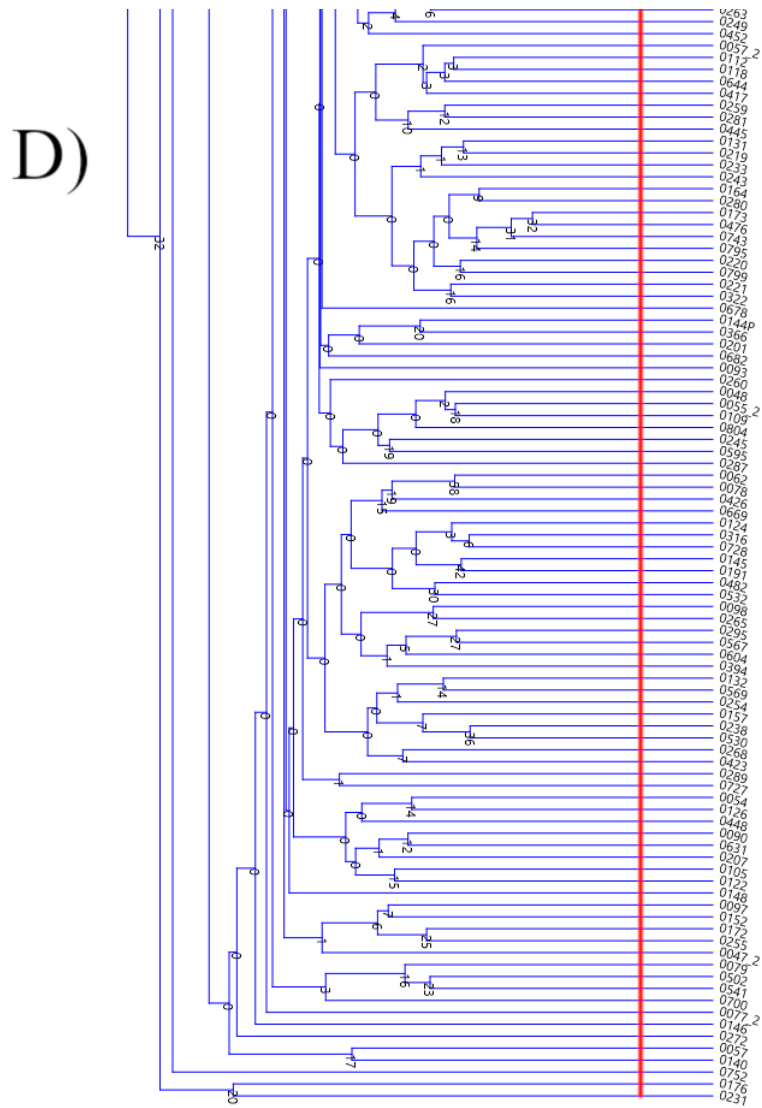


Figura 95. Parte D del clúster de individuos con repeticiones por el método ALPACA. Individuo 0263 al 0231.

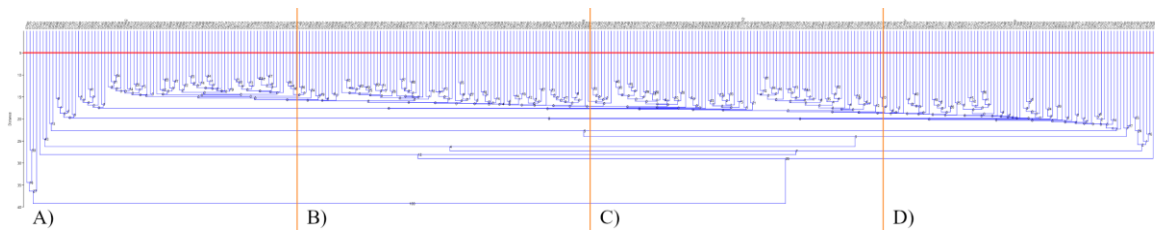


Figura 96. Clúster de los individuos sin repeticiones por el método GPSA, la línea roja se trazó en el valor de corte mínimo de distancia a 5. El dendograma se dividió en cuatro partes (A, B, C y D) para facilitar la visualización.

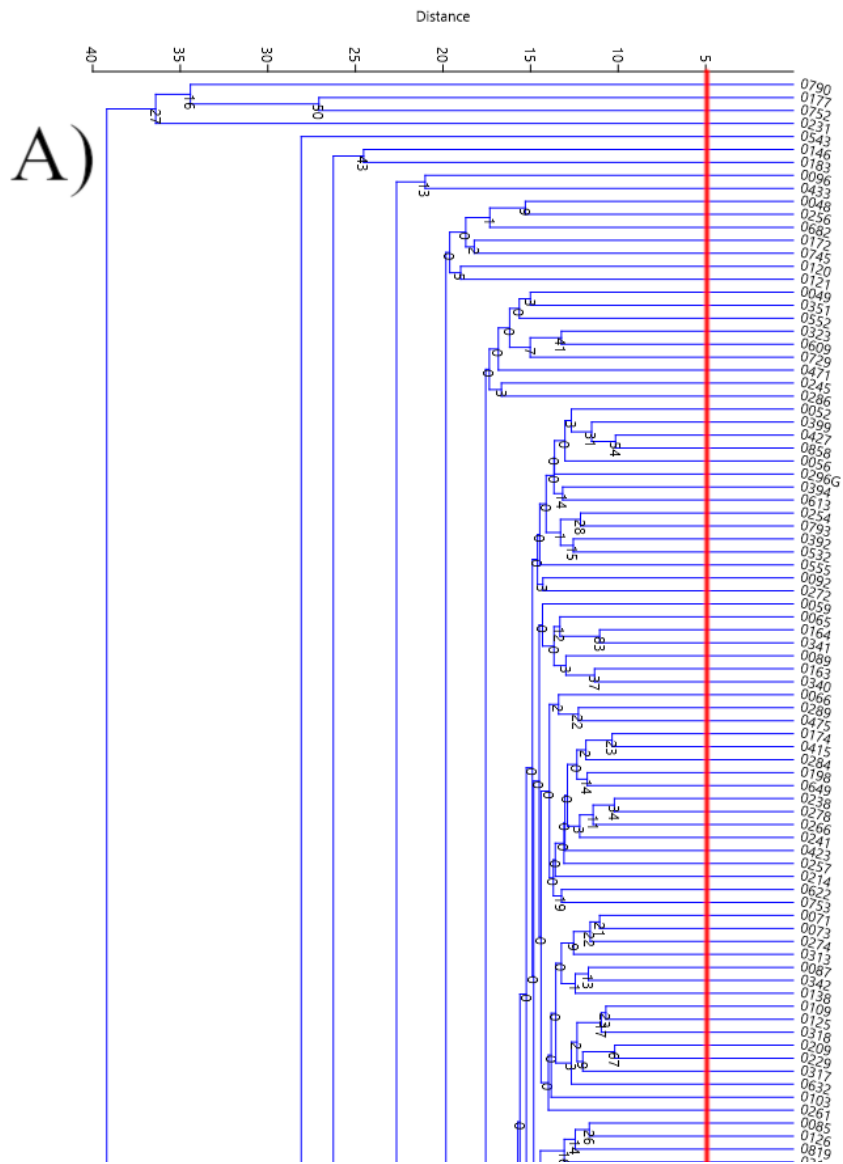


Figura 97. Parte A del clúster de individuos sin repeticiones por el método GPSA. Individuo 0790 al 10316.

B)

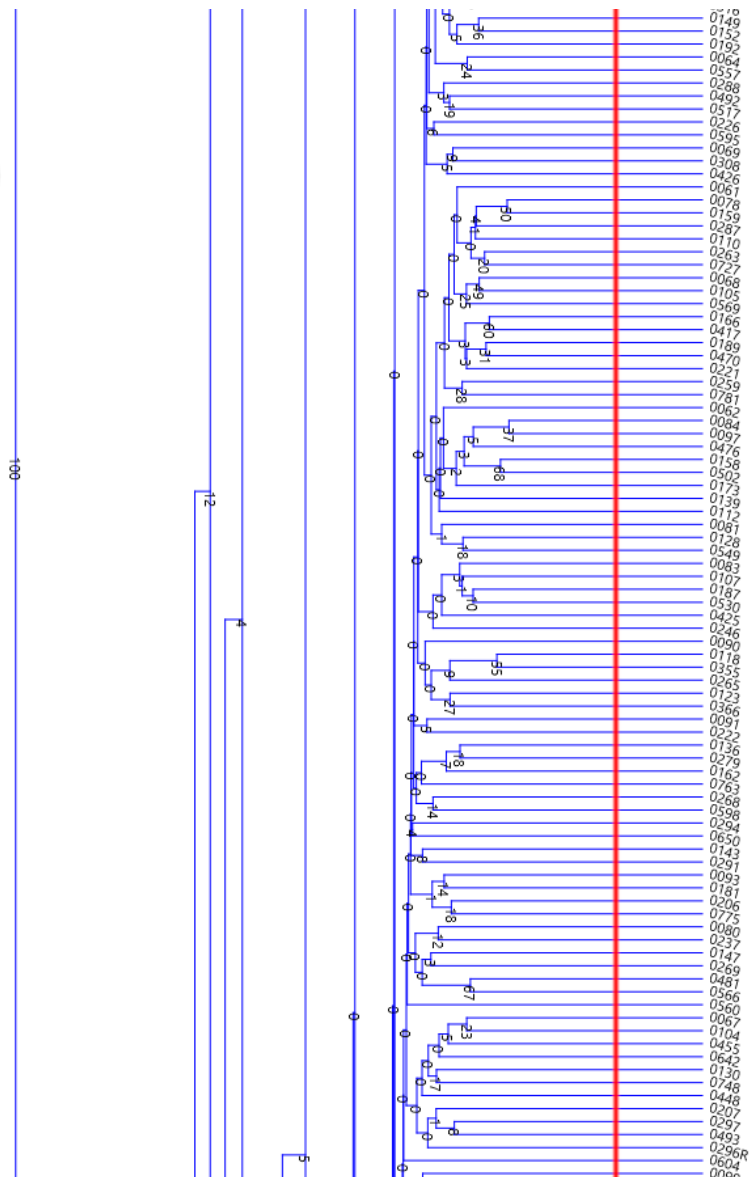


Figura 98. Parte B del clúster de individuos sin repeticiones por el método GPSA. Individuo 0149 al 0099.

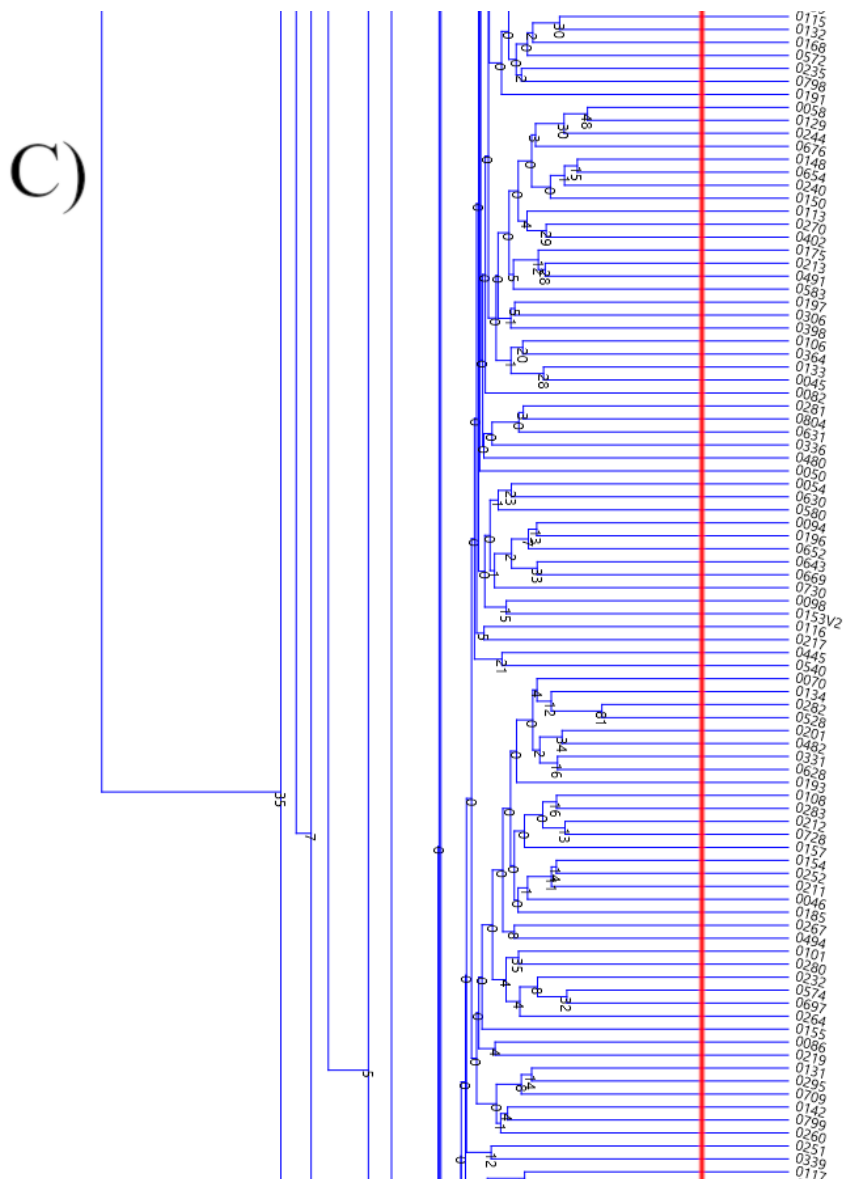


Figura 99. Parte C del clúster de individuos sin repeticiones por el método GPSA. Individuo 0115 al 0117.

D)

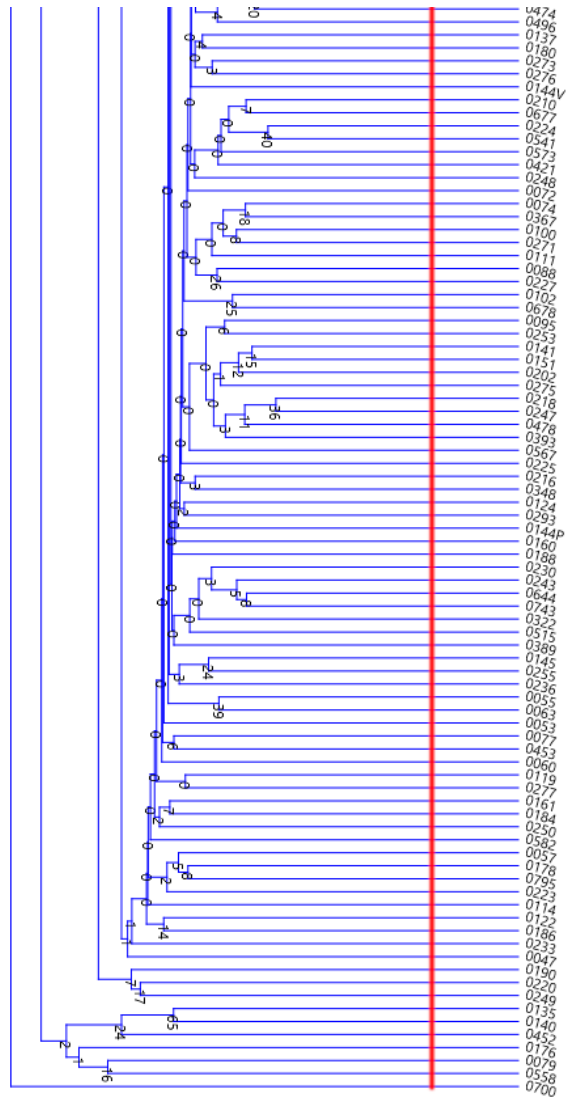


Figura 100. Parte D del clúster de individuos sin repeticiones por el método GPSA. Individuo 0474 al 0700.

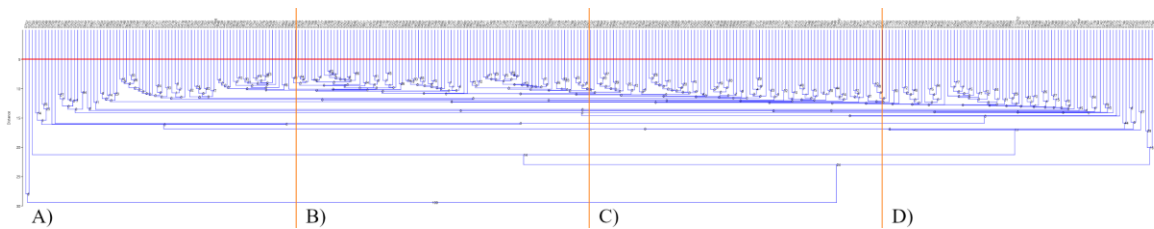


Figura 101. Clúster de los individuos sin repeticiones por el método GPSA, usando la forma media como modelo base, la línea roja se trazó en el valor de corte mínimo de distancia a 5. El dendrograma se dividió en cuatro partes (A, B, C y D) para facilitar la visualización.

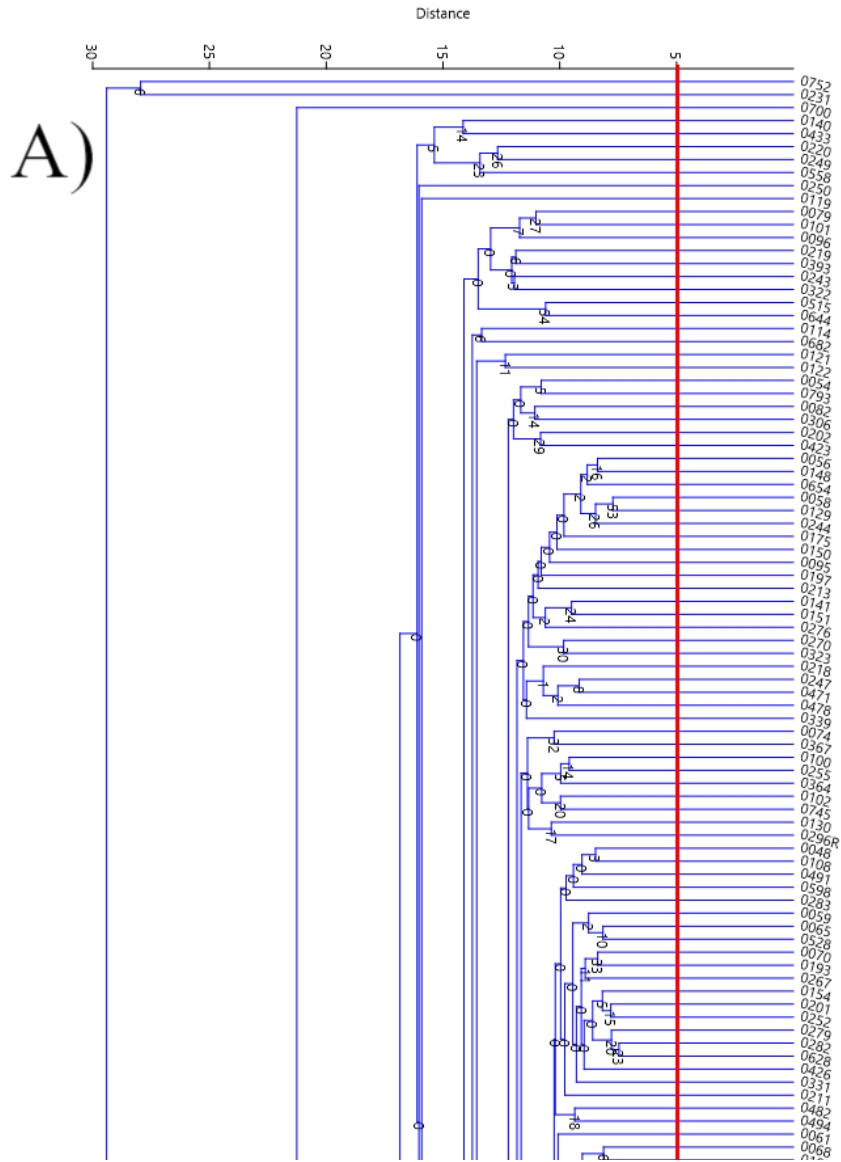


Figura 102. Parte A del clúster de individuos sin repeticiones por el método GPSA, usando la forma media como modelo base. Individuo 0752 al 0105.

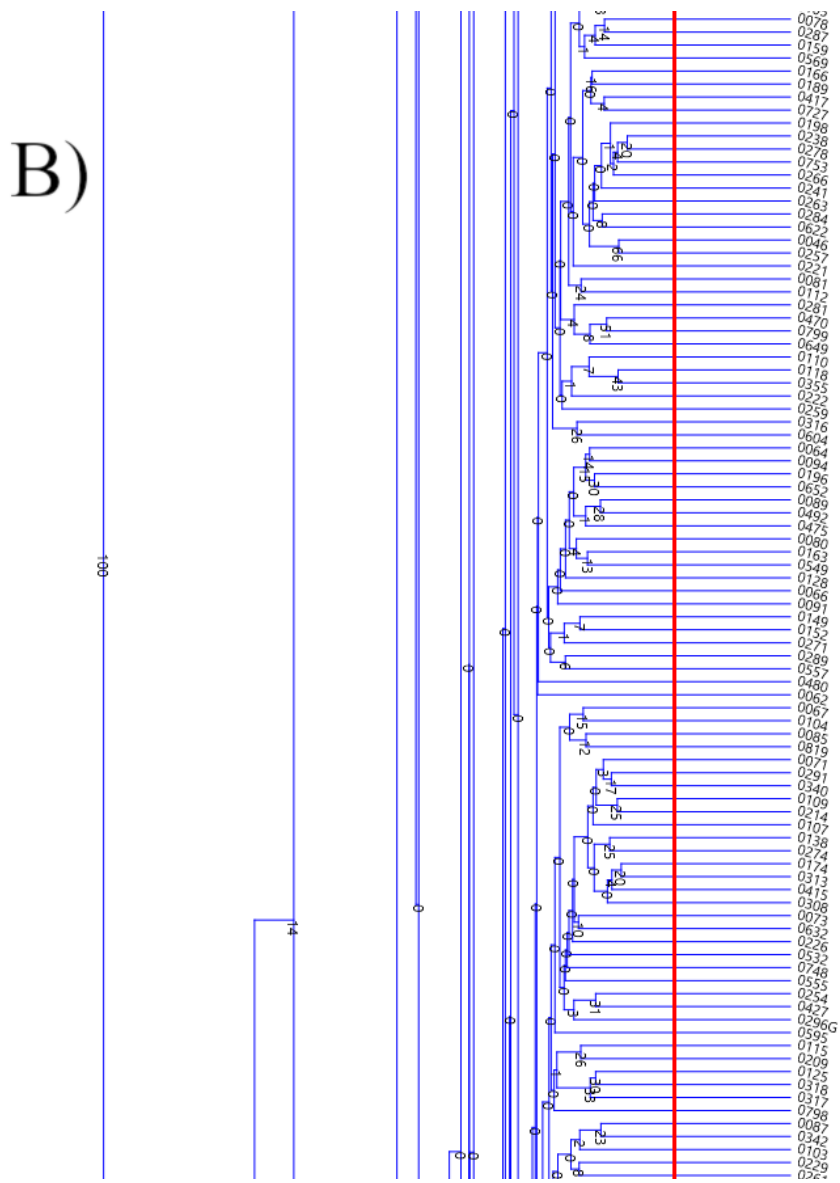


Figura 103. Parte B del clúster de individuos sin repeticiones por el método GPSA, usando la forma media como modelo base. Individuo 0078 al 0261.

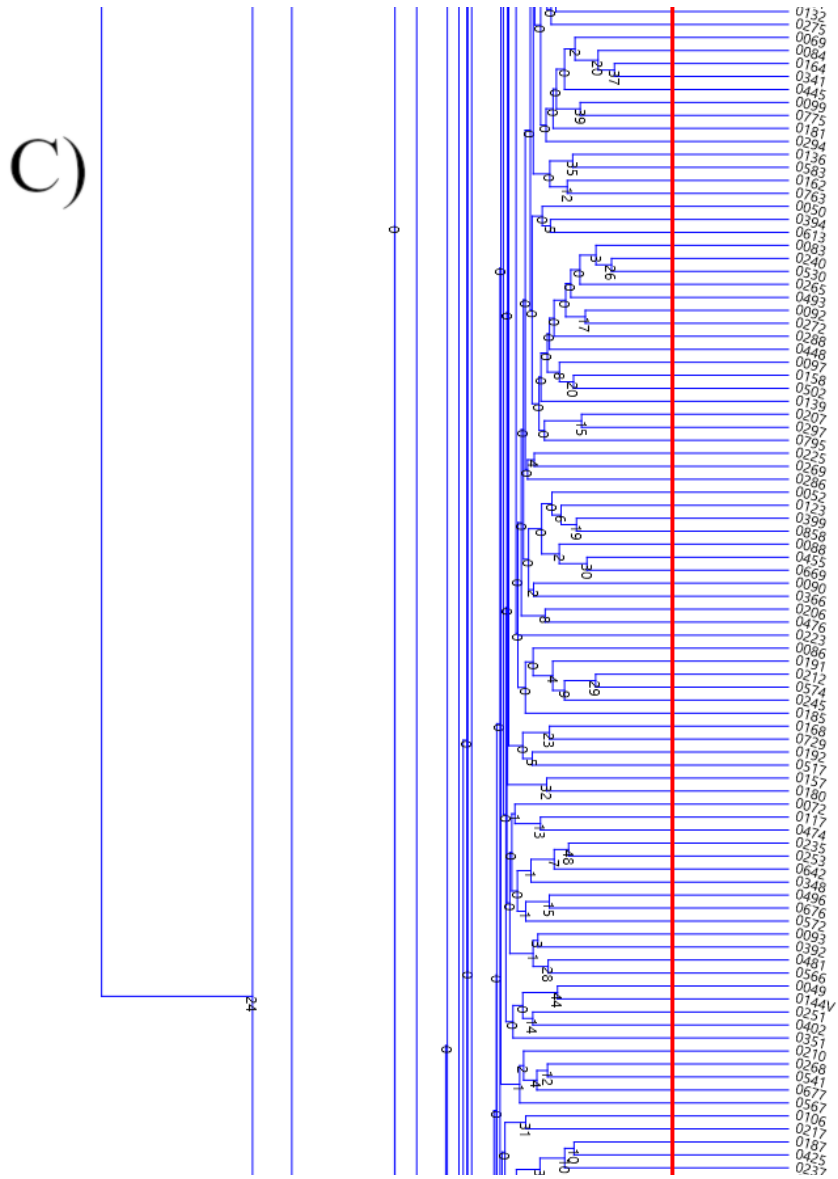


Figura 104. Parte C del clúster de individuos sin repeticiones por el método GPSA, usando la forma media como modelo base. Individuo 0132 al 0237.

D)

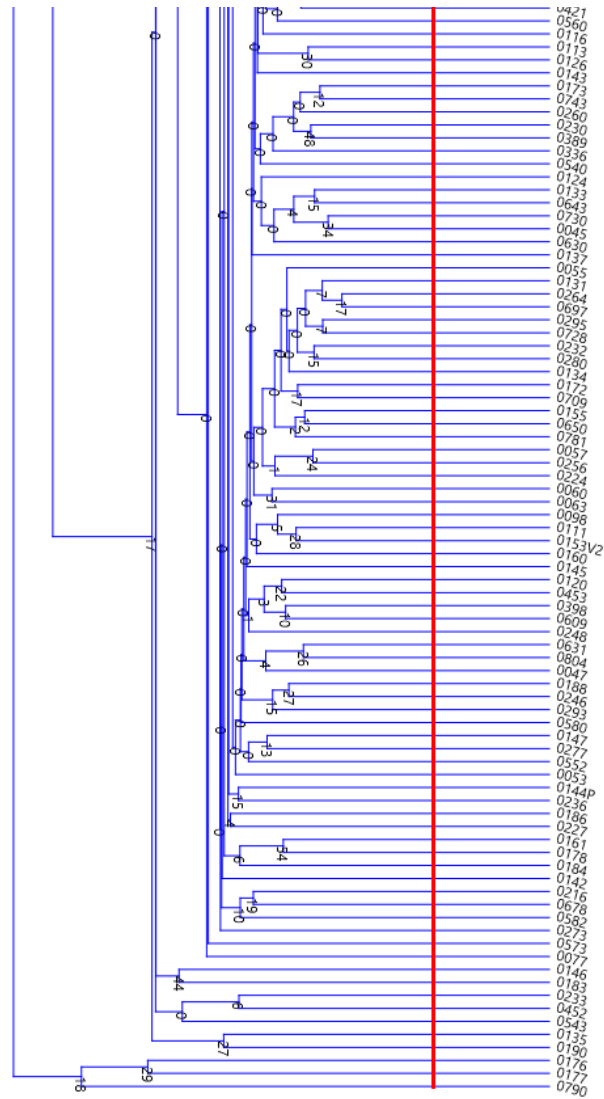


Figura 105. Parte D del clúster de individuos sin repeticiones por el método GPSA, usando la forma media como modelo base. Individuo 0421 al 0790.

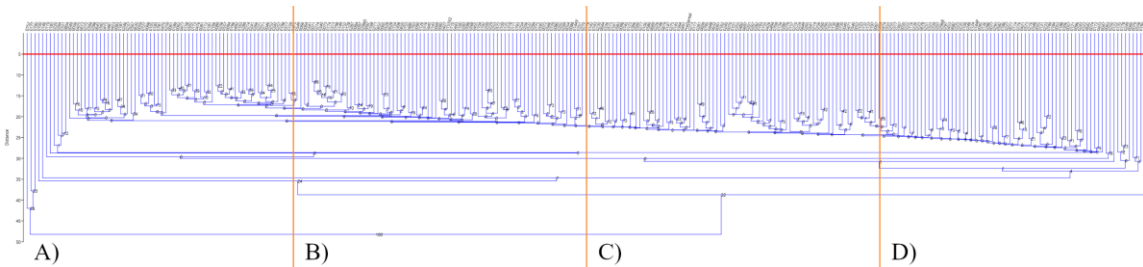


Figura 106. Clúster de los individuos con senos esfenoidales bilaterales sin repeticiones por el método GPSA, la línea roja se trazó en el valor de corte mínimo de distancia a 5. El dendrograma se dividió en cuatro partes (A, B, C y D) para facilitar la visualización.

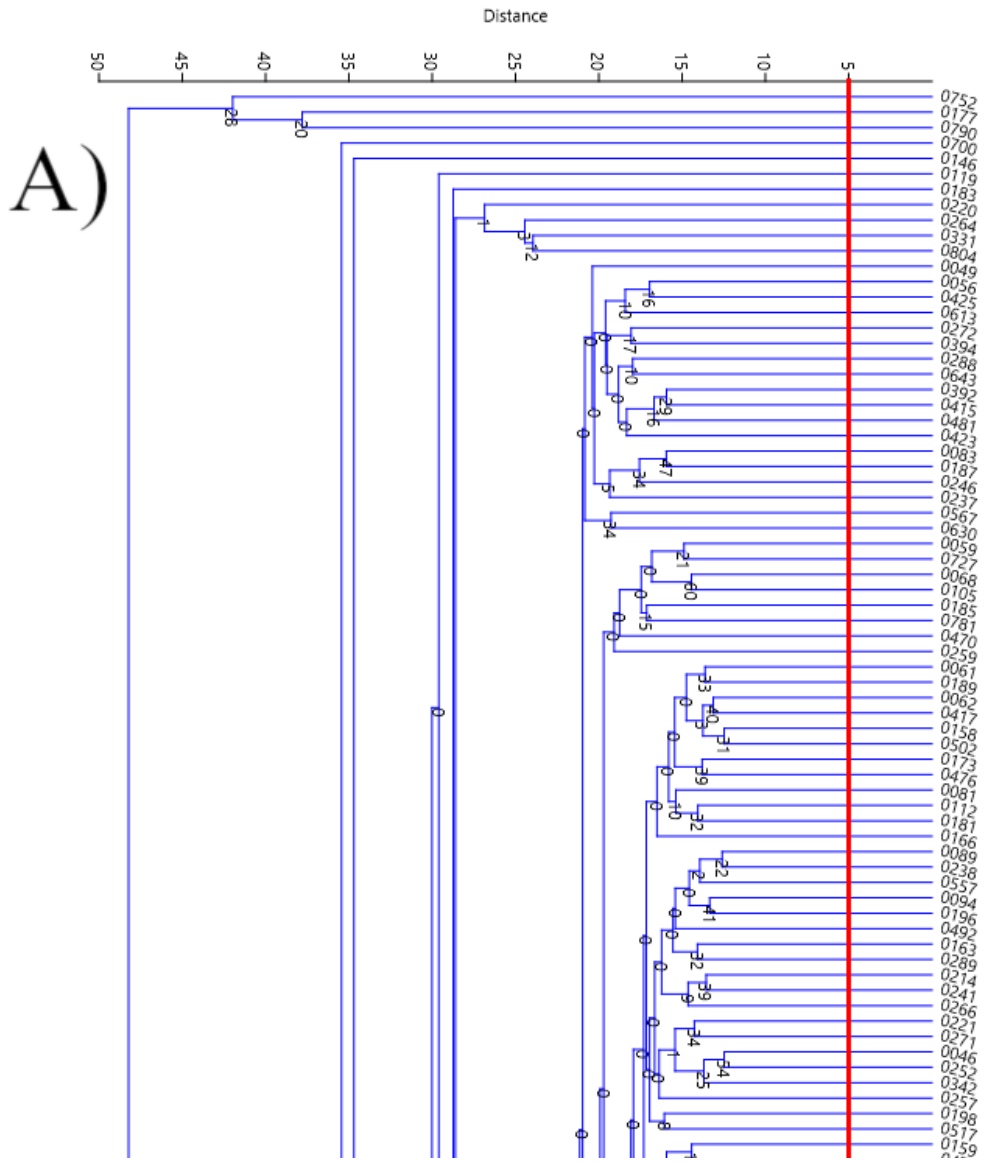


Figura 107. Parte A del clúster de individuos con senos esfenoidales bilaterales sin repeticiones por el método GPSA. Individuo 0752 al 0475.

B)

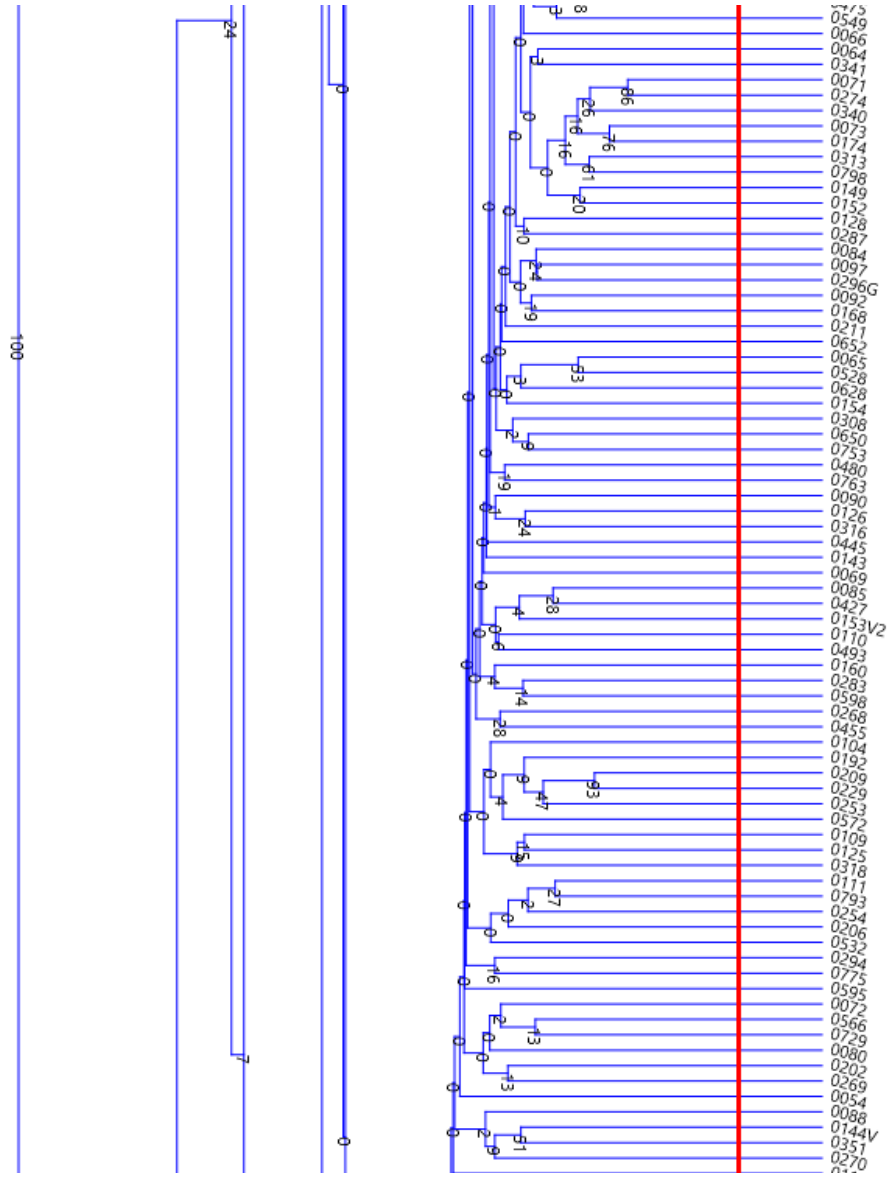


Figura 108. Parte B del clúster de individuos con senos esfenoidales bilaterales sin repeticiones por el método GPSA. Individuo 0549 al 0118.

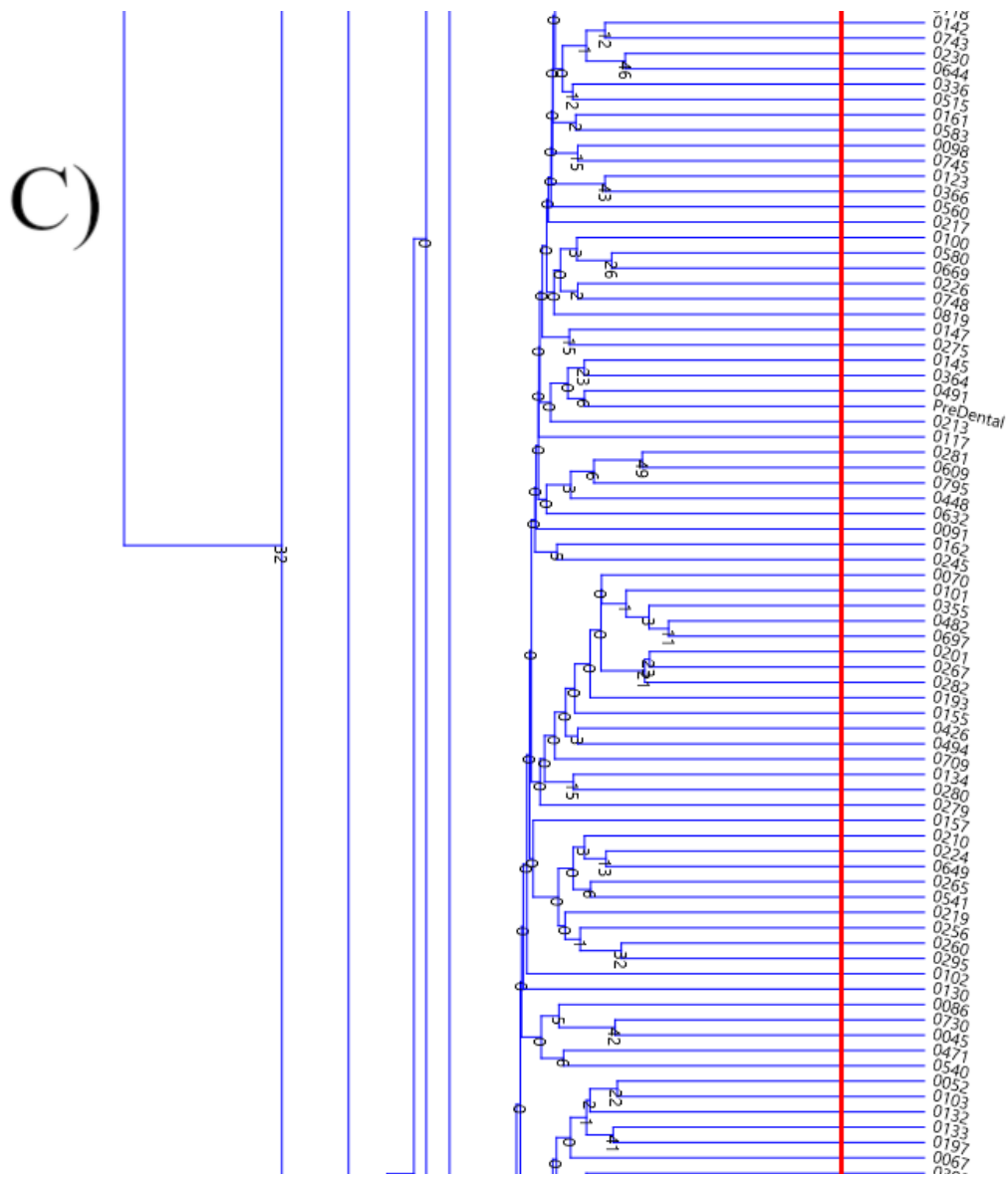


Figura 109. Parte C del clúster de individuos con senos esfenoidales bilaterales sin repeticiones por el método GPSA. Individuo 0142 al 0399.

D)

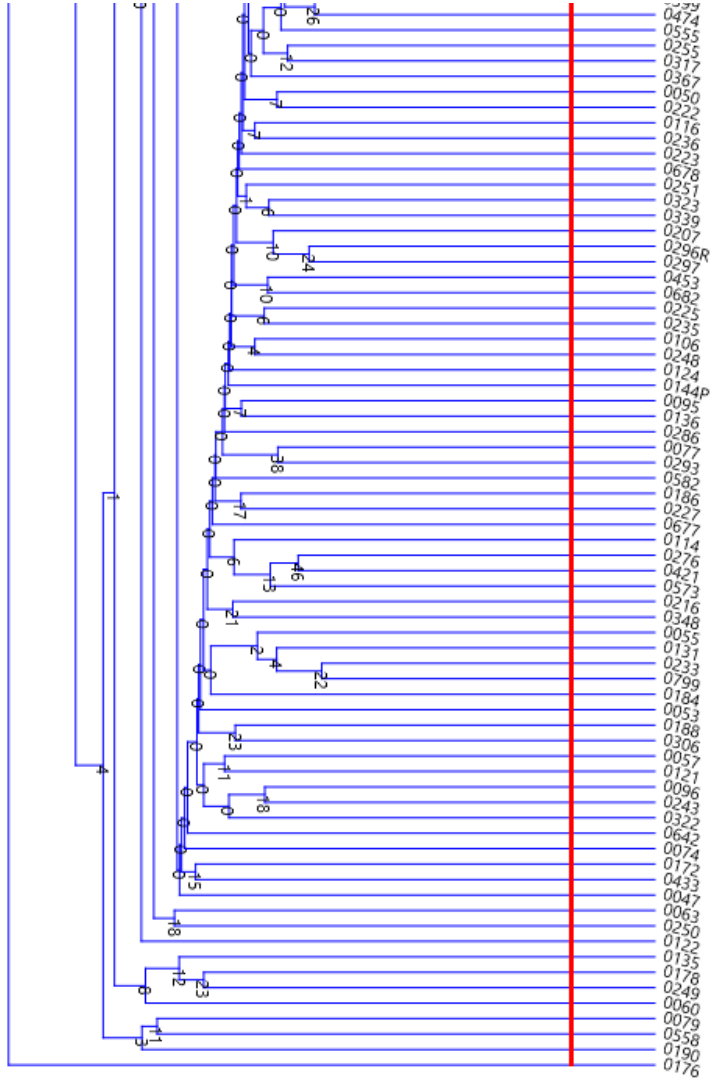


Figura 110. Parte D del clúster de individuos con senos esfenoidales bilaterales sin repeticiones por el método GPSA. Individuo 0474 al 0176.

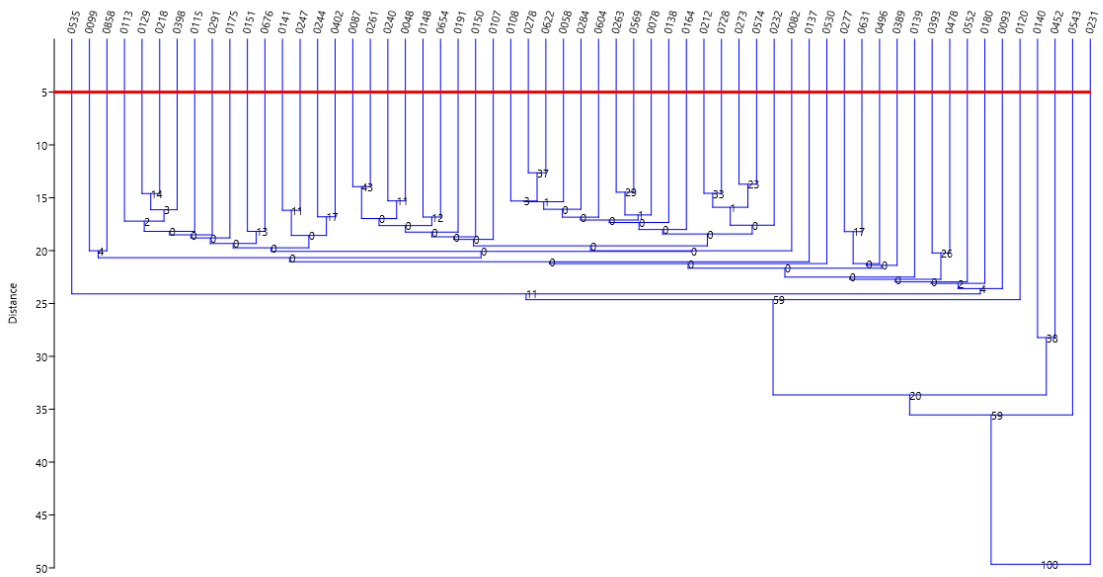


Figura 111. Clúster de los individuos con senos esfénoidales unilaterales sin repeticiones por el método GPSA, la línea roja se trazó en el valor de corte mínimo de distancia a 5.

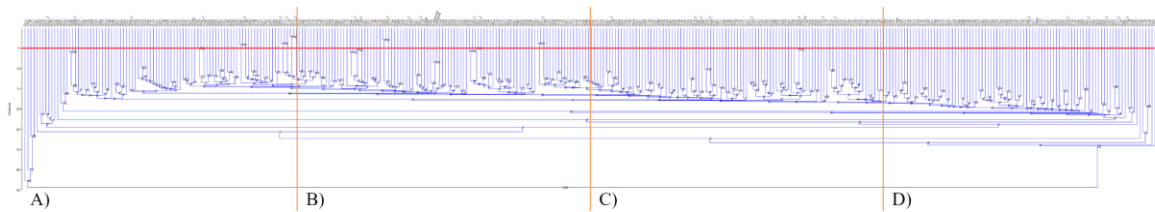


Figura 112. Clúster de los individuos con repeticiones por el método GPSA, la línea roja se trazó en el valor de corte mínimo de distancia a 5. El dendrograma se dividió en cuatro partes (A, B, C y D) para facilitar la visualización.

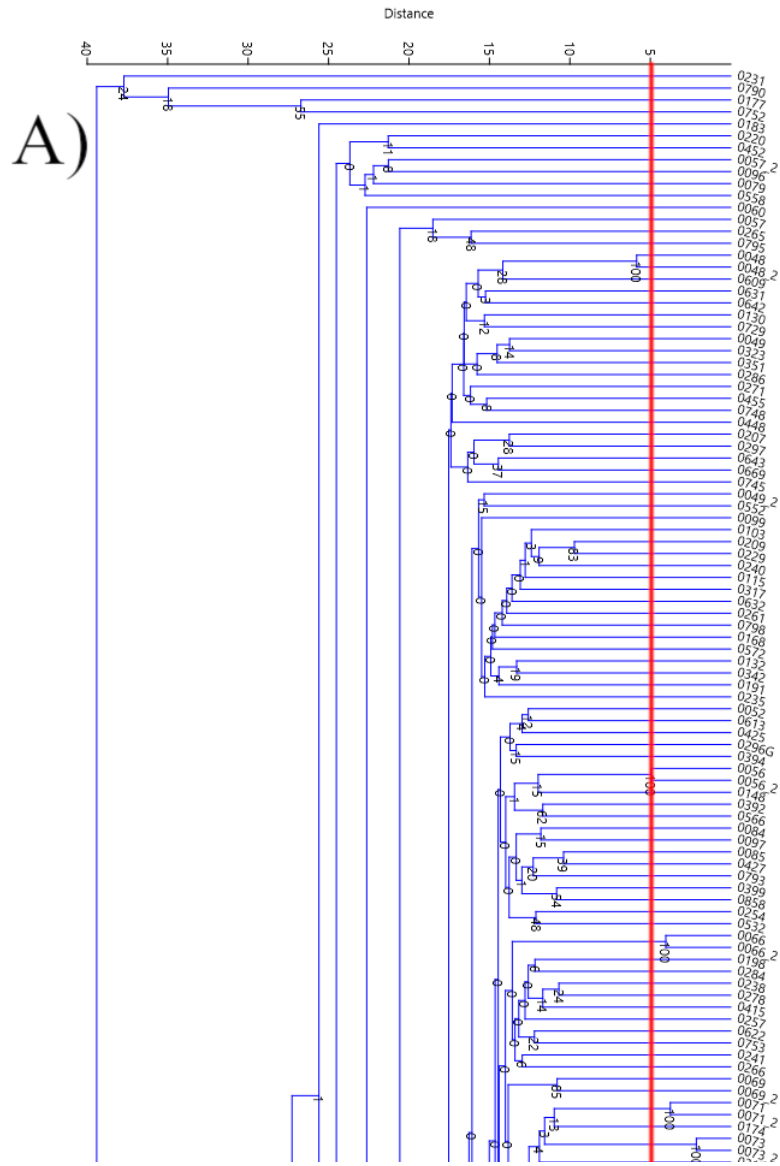


Figura 113. Parte A del clúster de individuos con repeticiones por el método GPSA. Individuo 0231 al1013.

B)

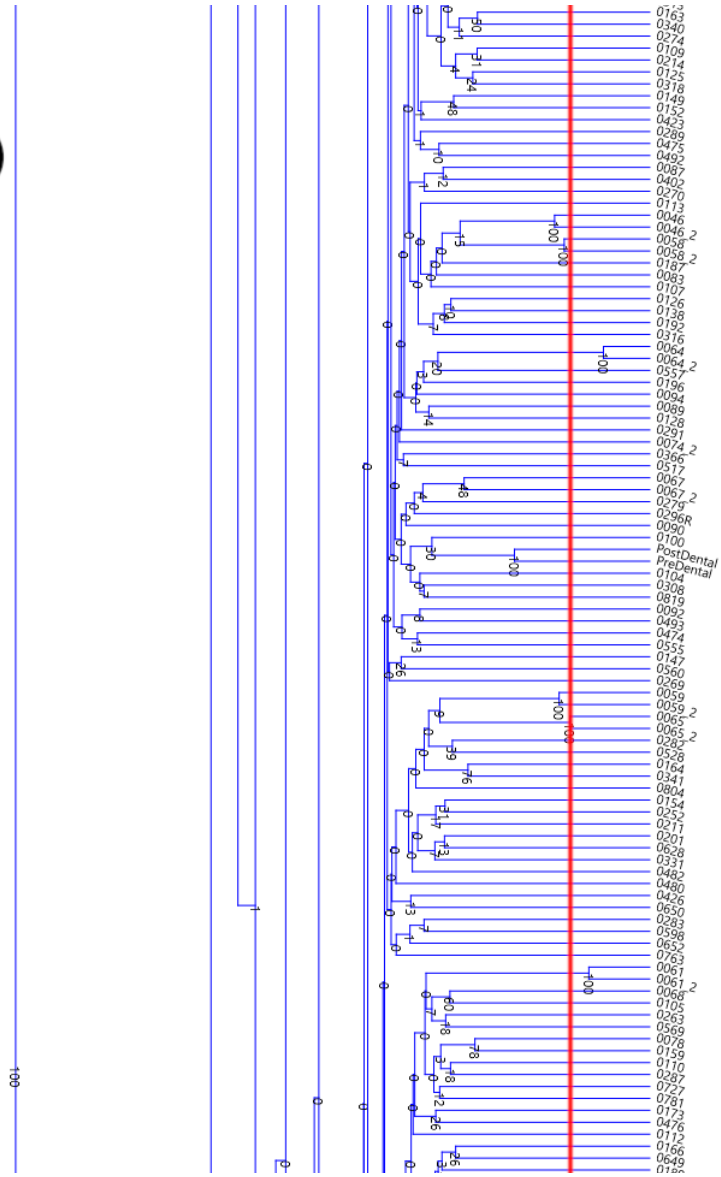


Figura 114. Parte B del clúster de individuos con repeticiones por el método GPSA. Individuo 0163 al10189.

C)

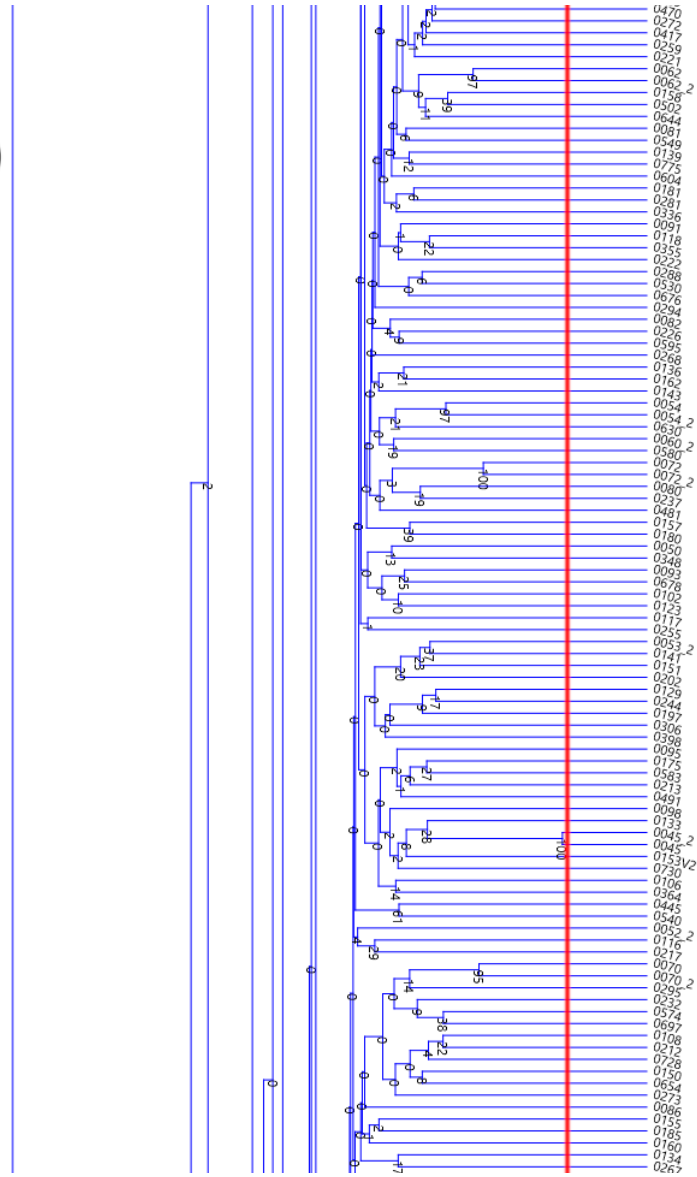


Figura 115. Parte C del clúster de individuos con repeticiones por el método GPSA. Individuo 0470 al 0267.

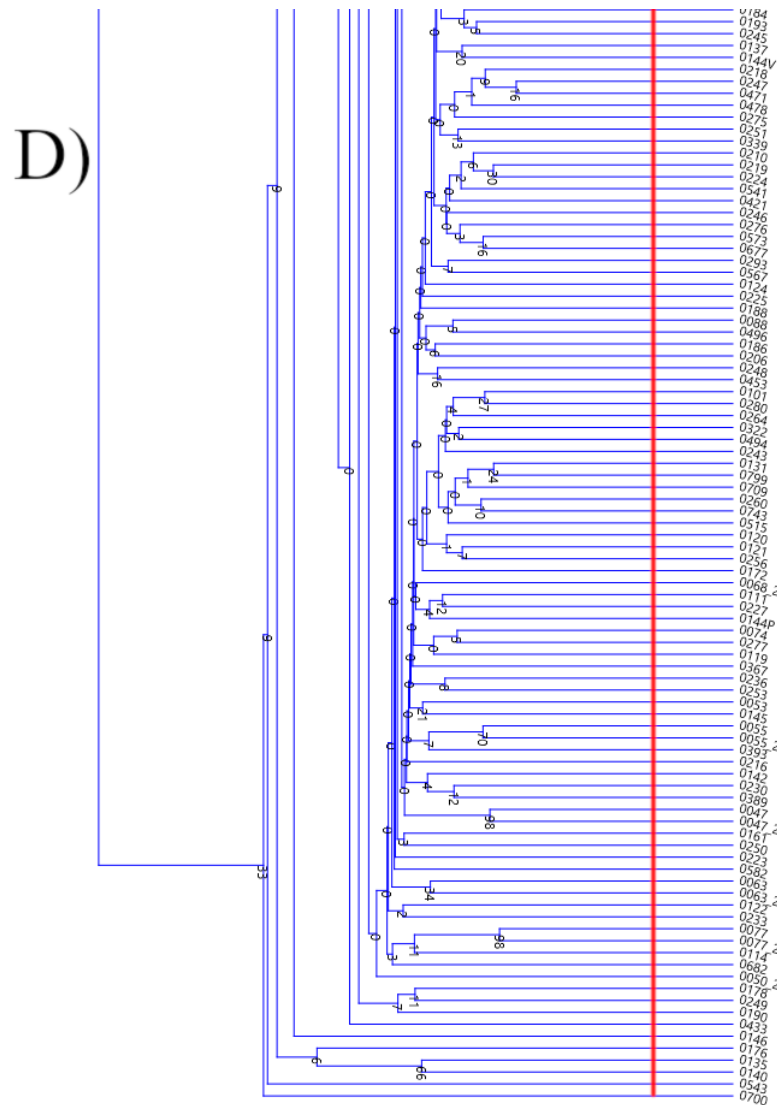


Figura 116. Parte D del clúster de individuos con repeticiones por el método GPSA. Individuo 0184 a10700.

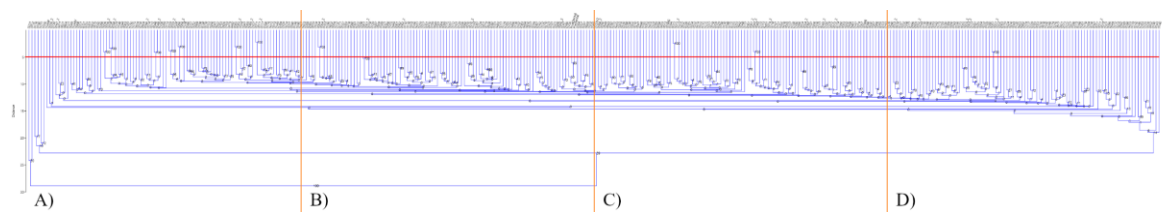


Figura 117. Clúster de los individuos con repeticiones por el método GPSA, usando la forma media como modelo base, la línea roja se trazó en el valor de corte mínimo de distancia a 5. El dendrograma se dividió en cuatro partes (A, B, C y D) para facilitar la visualización.

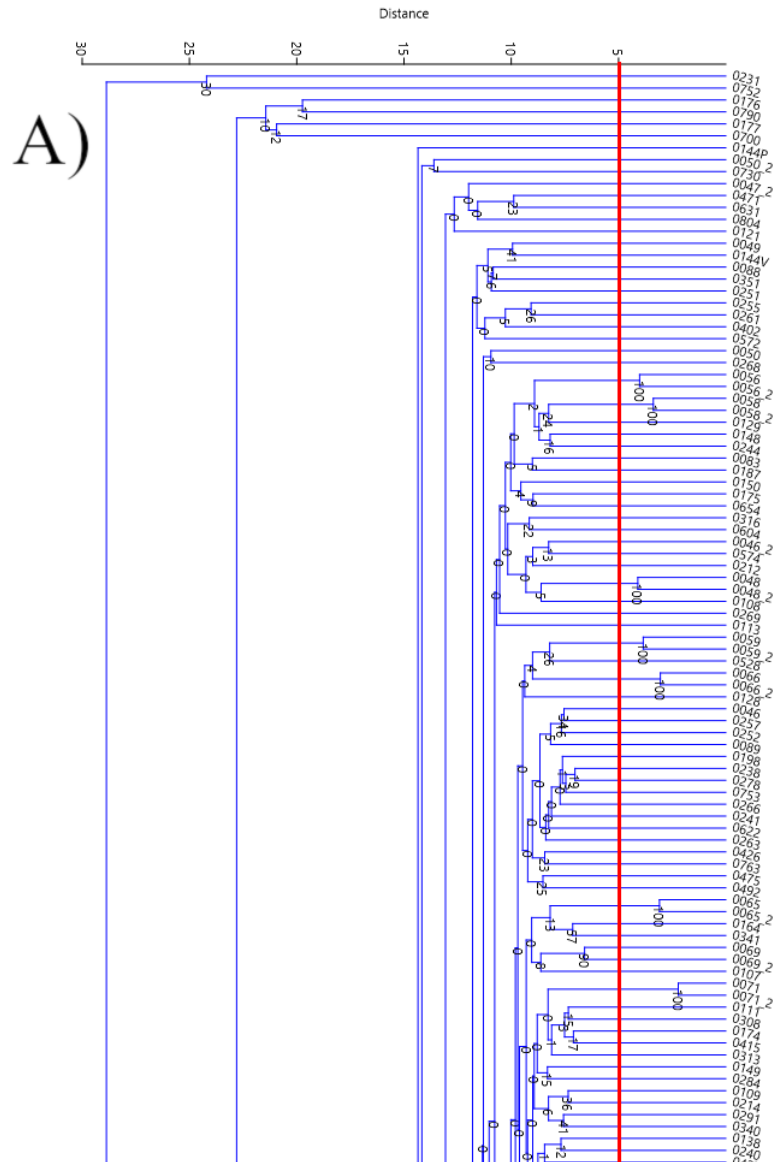


Figura 118. Parte A del clúster de individuos con senos esfénoidales con repeticiones por el método GPSA, usando la forma media como modelo base. Individuo 0231 al 0427.

B)

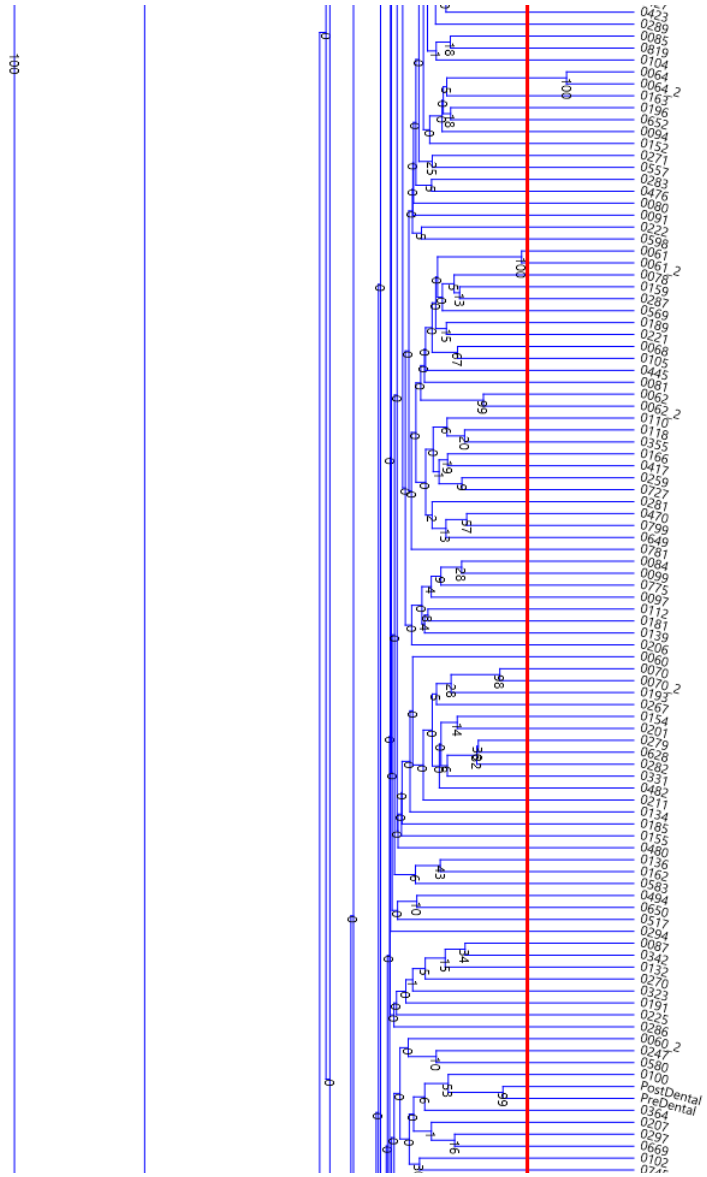


Figura 119. Parte B del clúster de individuos con senos esfenoidales con repeticiones por el método GPSA, usando la forma media como modelo base. Individuo 0423 al 0745.

C)

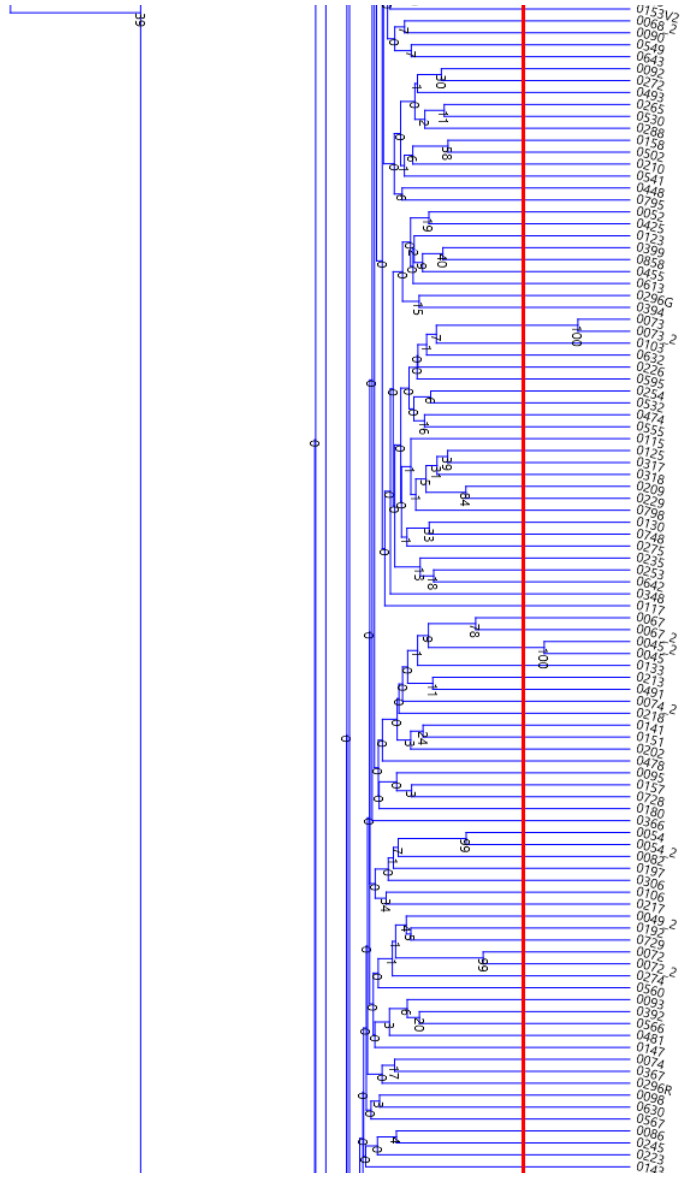


Figura 120. Parte C del clúster de individuos con senos esfénoidales con repeticiones por el método GPSA, usando la forma media como modelo base. Individuo 153V2 al 0143.

D)

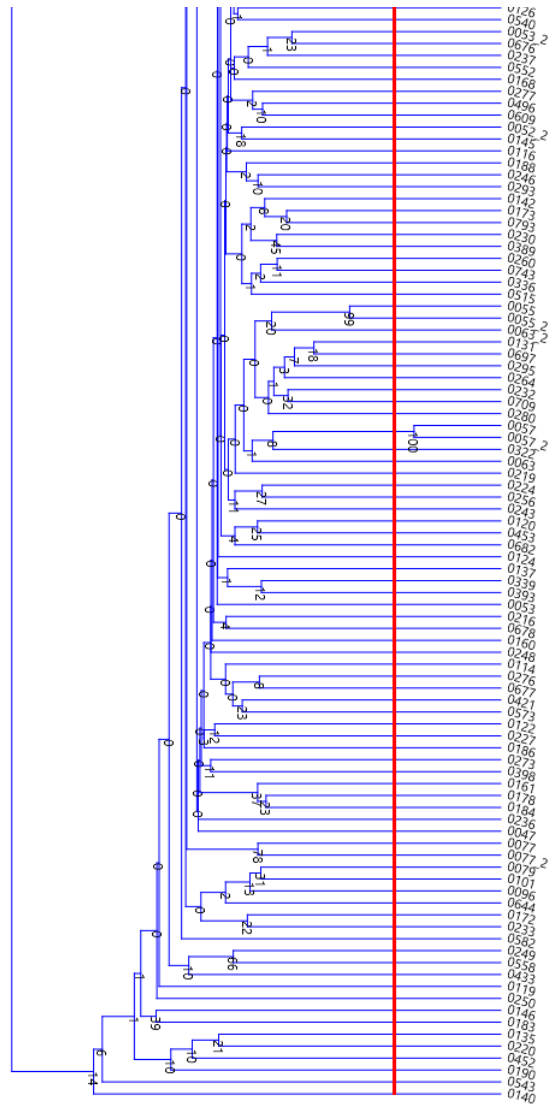


Figura 121. Parte D del clúster de individuos con senos esféricos con repeticiones por el método GPSA, usando la forma media como modelo base. Individuo 0126 al 0140.