



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO**  
POSGRADO EN ANTROPOLOGÍA  
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ANTROPOLÓGICAS

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD FACIAL DE LA POBLACIÓN MEXICANA  
CON MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA TRIDIMENSIONAL  
PARA IDENTIFICACIÓN FORENSE

**TESIS**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN ANTROPOLOGÍA

PRESENTA:  
**CLAUDIA PAULINA CRUZ VENEGAS**

DR. MIRSHA EMMANUEL QUINTO SÁNCHEZ  
CIENCIA FORENSE, FAC MEDICINA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo gracias a los beneficios del PNPC del CONACyT, del cual el Programa de la Maestría en Antropología de la UNAM forma parte.

También, esta tesis fue beneficiada por el proyecto PAPIIT-DGAPA, IA400221 titulado “Morfometría geométrica craneofacial: bases de datos biométricas e innovación en identificación humana”, con la beca de Maestría/Obtención de grado.

## AGRADECIMIENTOS

Llegó la hora de agradecer la culminación de este proyecto que inicié con entusiasmo, y sin embargo, hubo momentos difíciles de los cuales sentía no salir adelante. Así que gracias a cada una de las personas que me brindaron su ayuda y apoyo en estos más de dos años de trabajo de tesis. A sus enseñanzas, su compañía, paciencia, su tiempo y los ánimos que me infundían para alcanzar la meta. A cada una y uno, sin olvido alguno, les estoy infinitamente agradecida y a todos los llevo en mi pensamiento y corazón.

*A la memoria de Nimer*

## Capítulo 1

INTRODUCCIÓN.....	8
Planteamiento del problema.....	9
Justificación y uso de los resultados.....	13
Objetivos de investigación.....	15
Hipótesis de investigación.....	15

## Capítulo 2

MARCO TEÓRICO–CONCEPTUAL .....	16
Somatología facial .....	17
Los párpados.....	19
La nariz .....	21
Los labios.....	23
Tipos de perfil facial.....	24
Las orejas .....	27
Altura y anchura de la cara.....	28
Envejecimiento facial .....	28
Evolución de la cabeza humana.....	30
Modelo de biodistancia aplicado al análisis morfológico facial .....	35
Morfometría Geométrica 3D.....	39
<i>Landmarks</i> faciales.....	40
Alometría facial .....	42
Regresión multivariante de la forma.....	42
Morfoespacios: Análisis de Componentes Principales .....	43
La integración morfológica como <i>proxy</i> de la variabilidad modular .....	44
Variación entre grupos: Análisis de Variación Canónica.....	45
Comparación entre grupos: Análisis de Función Discriminante .....	46
Modelo de agrupación: Análisis de conglomerados.....	46
Análisis de patrones de simetría-asimetría .....	48

Análisis de patrones geoespaciales.....	50
Autocorrelación espacial, Índice de Moran.....	50
Interpolación geoespacial IDW .....	51
Fotogrametría en la reconstrucción de un modelo facial en 3D .....	53
Modelo general del error de medición.....	55
Pruebas de error de medición entre observadores.....	56
Identificación facial de personas vivas por medio de imágenes .....	57
Desafíos en la identificación facial en la antropología forense .....	58

### Capítulo 3

ANTECEDENTES.....	61
Enfoque morfológico, morfoscópico.....	62
Enfoque métrico.....	63
Métodos de superposición .....	65

### Capítulo 4

SUJETOS, MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	67
La muestra.....	68
Fenotipado.....	71
Protocolo de fotografía científica facial.....	71
Protocolo de digitalización de 34 landmarks faciales .....	73
Estimación genómica de la ancestría y heterocigosidad .....	75
Diseño experimental .....	76
Pruebas de error de medición entre observadores.....	76
Regresión multivariante de la forma.....	76
Morfoespacio: Análisis de Componentes Principales.....	76
La integración morfológica como proxy de la variabilidad modular.....	77
Variación entre grupos: Análisis de Variación Canónica .....	77
Autocorrelación espacial: Índice de Moran.....	77
Interpolación geoespacial IDW .....	78
Comparación entre grupos: DFA.....	78
Modelos de agrupación: Análisis de conglomerados .....	78

## Capítulo 5

RESULTADOS .....	80
El error intra e interobservador .....	81
Regresión multivariante de la forma .....	81
Morfoespacios: Análisis de Componentes Principales .....	86
Integración morfológica como <i>proxy</i> de la variabilidad modular .....	90
Variación entre grupos: Análisis de Variación Canónica .....	92
Autocorrelación espacial: Índice de Moran .....	98
Interpolación geoespacial IDW .....	100
Comparación entre grupos: DFA .....	107
Modelo de agrupación: Análisis de conglomerados .....	109

## Capítulo 6

DISCUSIÓN .....	112
Error de medición .....	113
Regresión multivariante de la forma .....	115
Morfoespacios: PCA e integración morfológica .....	119
Variación entre grupos: CVA .....	120
Índice de Moran y Ponderación geoespacial IDW .....	122
Comparación entre grupos DFA y Análisis de conglomerados .....	128

## Capítulo 7

CONCLUSIONES .....	131
--------------------	-----

## Capítulo 8

BIBLIOGRAFÍA .....	134
--------------------	-----

Capítulo 1:  
INTRODUCCIÓN

## Planteamiento del problema

La antropología biológica se define como el estudio de la evolución y la variabilidad biológica y cultural de los humanos en el presente y en el pasado. Realiza análisis y comparaciones entre distintas poblaciones. Interpreta la variabilidad genética y fenotípica de la especie humana entre y dentro de las poblaciones. Esa variación se estudia mediante la observación e inspección de rasgos anatómicos. Los antropólogos biológicos, con los conocimientos sobre la evolución y la variabilidad del cuerpo humano, diseñan investigaciones con metodologías tomadas de la teoría de la genética de poblaciones y con herramientas como la morfometría geométrica, para aplicarlas en trabajos de antropología forense como es el caso de la identificación humana.

La antropología forense tiene como uno de sus objetivos la identificación de personas vivas o fallecidas, valiéndose de rasgos somáticos faciales o corporales, así como de restos óseos. Es cierto que se le conoce por centrarse en técnicas de la osteología, pero no sólo es la disciplina encargada de identificar cadáveres esqueletizados, cremados y en descomposición. La identificación de personas vivas es un aspecto diferente que se ocupa de la diversidad humana y se esfuerza por verificar las características morfológicas que hacen que la fisonomía de una persona sea distinta de otra (Cattaneo, 2007). Puesto que la cara humana es un fenotipo complejo y se presenta como una de las partes más complejas para la identificación de una persona. En la identificación facial forense se trata de reconocer que una persona es la misma que se supone es o se busca, a partir de un conjunto de caracteres morfológicos.

Para realizar una evaluación facial en el ámbito forense, se cuenta con algunos procedimientos. Por ejemplo, el análisis morfológico (Bertillon, 1890; Ohlrogge, 2008, 2009; Ritz-Timme et al., 2011; Vanezis et al., 1996) compara formas faciales. Sin embargo, algunos autores lo describen como subjetivo para los fines judiciales; debido a que no incluyen tasas de error en los cálculos de coincidencia entre

individuos (Gibelli et al., 2016; Porter & Doran, 2000). En México se generó un programa informático con base en la variación facial de una muestra fotográfica de población mexicana para la comparación de formas faciales con rasgos morfológicos propios del país para la identificación personal (Serrano et al., 1999; Villanueva, 2010) actualmente forma parte de la Fiscalía General de la República y de investigaciones que analizaron esa muestra poblacional con una metodología morfogeométrica bidimensional (Farrera, García & Villanueva, 2016).

Otro enfoque para realizar una identificación facial es el métrico (Halberstein, 2001; Kleinberg et al., 2007; Lynnerup et al., 2003; Smeets et al., 2010) donde se comparan características faciales derivadas de mediciones o índices. Pero sus limitaciones son que no proporciona una confirmación sobre si dos perfiles pertenecen a la misma persona, ya que varios individuos pueden compartir exactamente la misma medida facial. Y en otros casos, la calidad y resolución de la imagen, posición de la cabeza y cara constituyen limitantes en el proceso (Gibelli et al., 2016; Smeets et al., 2010).

También, existe la manera de realizar una identificación por medio del reconocimiento facial automatizado (Kleinberg & Siebert, 2012; Tome et al., 2013), el cual se basa en sistemas de inteligencia artificial que permiten cotejar rápidamente bases de datos que se alimentan de acuerdo con variantes faciales sesgadas; puesto que en algunos casos el tamaño de la muestra es reducida o en otros, no toman en cuenta el contexto poblacional (Phillips et al., 2004).

Existen además, los análisis de superposición (Biwasaka et al., 2010; Cummaudo et al., 2013; De Angelis et al., 2009; Farrera et al., 2016; Kovacs et al., 2006; Lynnerup et al., 2003; Yoshino et al., 2000, 2002, 2005) donde combinan la forma y tamaño de imágenes 2D y 3D, pero en sus métodos se desconoce un valor de probabilidad válido en la evaluación de una coincidencia (Gibelli et al., 2016). Una limitación importante de los métodos de comparación de imágenes 2D con 2D,

conviene el requisito fundamental de que la imagen comparativa debe mostrar al sospechoso en la misma posición exacta de la persona que se representa en la imagen. Y muchas veces esta condición es difícil que se pueda cumplir. Incluso pequeñas diferencias en la orientación o la expresión facial en las imágenes comparadas pueden causar errores sustanciales en el proceso de superposición (Biwasaka et al., 2010; Yoshino et al., 2000).

Por lo tanto, existe un número considerable de investigaciones forenses centradas en imágenes para sus estudios sobre la identificación personal. Sin embargo, se leyó que para mostrar la singularidad de una cara humana de manera concluyente existen muchos problemas. Por ejemplo, comparar rostros en imágenes bidimensionales corre los riesgos de encontrar diferencias en la orientación y postura de la persona en el momento de la toma o una iluminación deficiente que provoca baja resolución de la imagen. Esto resulta problemático para los peritos en el momento del establecimiento de puntos de referencia. En este sentido, los métodos más novedosos se esfuerzan por proyectar un modelo tridimensional (3D) de la persona, creado a partir de las imágenes en 2D del individuo a identificar (Cattaneo, 2007). Los modelos 3D conservan la profundidad y naturaleza del fenotipo facial, a fin de lograr una categoría de coincidencia positiva o inconcluyente con un mínimo margen de error en una identificación facial.

Es importante reconocer la diferencia entre los actos de reconocimiento e identificación facial, ya que a menudo se utilizan indistintamente de forma incorrecta. El reconocimiento se basa en el recuerdo de un rostro visto anteriormente, es impreciso y está sujeto a contexto, lo que hace que se recuerde información errónea como si fuera un hecho. Está documentado que la memoria de los testigos oculares y el recuerdo facial están plagados de dificultades (Shepherd 1977, Wells 1993, Henderson 2001, Roebbers y Schneider 2001). En cambio, la comparación facial como la practica un perito es claramente diferente. En este caso se compara activamente una cara humana o una fotografía que no se había visto antes con un segundo rostro o

fotografía que tampoco se había visto. Los problemas de similitud surgen con el método aplicado, o cuando los rostros son muy parecidos en cuanto a forma, rasgos y proporciones, y se complican aún más si ese rostro se captó en una imagen en condiciones deficientes.

Una premisa básica para entender por qué se puede utilizar la comparación facial para identificar a los individuos es porque todas las caras humanas son únicas para cada individuo. La cara tiene una combinación individual de forma y rasgos dictados por la genética. Es esta combinación única la que diferencia un rostro de otro. Hay muchas pruebas que sugieren, que en el reconocimiento se trata a las caras no como rasgos individuales, sino como una amalgama de rasgos y sus interrelaciones (Evans, 2014). Un individuo con un fenotipo específico pertenece a una población con rasgos fenotípicos asociados. Dicha población presenta una variación en su fenotipo pues el tiempo con sus múltiples factores como la migración, la supervivencia, el clima, entre otros; han influenciado en su morfología facial (Richmond et al., 2018). Se tiende a ubicar a un individuo desconocido dentro de un universo biosocial con el que comparte un territorio, un origen común y patrones morfológicos afines. En este sentido se puede estimar el origen geográfico de un individuo asignándola a un grupo poblacional con características afines a ese grupo. Por lo tanto, comprender mejor la variación morfológico facial de una población y explorar las relaciones biológicas y su distribución geográfica pueden ayudar en la práctica de la antropología forense para hallar coincidencias en la estimación de una identidad.

Gran parte del debate contemporáneo en la ciencia forense se refiere a la validez y la admisibilidad de la evidencia científica en los tribunales para el establecimiento de metodologías sustentadas en teorías sólidas (Mallett & Evison, 2013). Es urgente existan normas de calidad reconocidas que puedan suscribir los expertos en comparación facial, ya que existen problemas metodológicos, técnicos y teóricos en la práctica de la comparación facial (Edmond, 2010). Se cuestiona que no

existe una base con modelos 3D con características faciales a partir de la cual impugnar la prevalencia o no de determinados rasgos faciales en una población determinada. Además, es importante la recopilación y creación de bases de datos para mejorar los datos cuantitativos para los análisis de la identificación forense. Ya que al fenotipar muestras representativas de una población a un nivel regional se podrá evaluar la frecuencia de rasgos faciales y comprender su distribución geográfica.

En México no se cuenta con una base de datos con modelos 3D para identificación facial humana, por lo tanto, es primordial crearla y con ella analizar la variabilidad morfológica del país, cuyo fundamento teórico se sustenta sólidamente en la genética de poblaciones. Estos modelos de referencia 3D conservan la profundidad y naturaleza de la cara con un mínimo de margen de error. Con ellos es posible evaluar características y patrones de similitud o disimilitud necesarios en un proceso de identificación facial forense. Dichos modelos 3D se construyen con la técnica de fotogrametría mediante fotografías que para su obtención siguieron un protocolo estandarizado de fotografía científica.

El análisis morfológico de los modelos de referencia facial 3D se hace siguiendo la metodología de la morfometría geométrica y estadística multivariante. Los cuales permiten comparar la forma pura y encontrar patrones, similitudes o diferencias, necesarios en el proceso de una identificación. En un caso forense donde el perito deba realizar una comparación, la puntuación de similitud de un rostro con otras caras de una determinada población de una región geográfica debe ser lo suficientemente alta para pertenecer a esa población.

## Justificación y uso de los resultados

La admisibilidad en la evidencia científica en los tribunales puede ser un tema delicado cuando se consideran diferentes métodos y técnicas, especialmente si son nuevos y no se han aplicado antes en un contexto determinado. Al igual que en otros campos de investigación forense, las pruebas relativas a la identificación de las

personas vivas deben presentarse al juez, quien luego decidirá si los métodos y técnicas propuestos pueden ser admitidos para el juicio. Los recientes avances en la admisibilidad de las pruebas imponen requisitos más completos tanto a la experiencia de los científicos, así como a la metodología empleada en las pericias, en comparación con los testimonios de expertos anteriores, que gran parte de sus evidencias eran basadas en opiniones (Abate et al., 2007; Gibelli et al., 2016).

La introducción de los criterios Daubert<sup>1</sup> en la presentación en el tribunal del testimonio científico acompañó el desarrollo de nuevas muestras y herramientas humanas comparativas para el análisis y el intercambio de datos (Dirkmaat et al., 2008). Para que un determinado método científico se utilice en los tribunales es importante considerar su capacidad de prueba, la existencia de tasas de error, la aceptación entre pares tras su difusión en publicaciones científicas y los medios de control de calidad para la aceptación del método (Gibelli et al., 2016). En este sentido, se necesita más investigación para el establecimiento de metodologías con datos cuantitativos en los procedimientos judiciales (Mallett & Evison, 2013), por lo tanto es necesario realizar investigaciones interdisciplinarias para establecer la admisibilidad de las pruebas de comparación e identificación facial. La mejora de los métodos para la comparación facial probatoria de los tribunales se basa en la recopilación de grandes bases de datos de imágenes faciales que permiten el análisis de la variación de la forma de la cara. En este preámbulo, la presente investigación propone crear una base de datos de modelos tridimensionales de la población mexicana. Y analizar su variabilidad facial biogeográfica con la metodología de la

---

<sup>1</sup> El estándar Daubert se fundamenta en la regla 702 del *Federal Rules of Evidence* del año 1974 y enmendado en 2014. Dicha regla habla sobre el testimonio de testigos expertos, que estén calificados como expertos por conocimiento, habilidad, experiencia, capacitación o educación para testificar en forma de opinión o de otra manera si: (a) el conocimiento científico, técnico u otro conocimiento especializado del experto ayudará al evaluador de hechos a comprender la evidencia o determinar un hecho en cuestión; (b) el testimonio se basa en hechos o datos suficientes; (c) el testimonio es producto de principios y métodos confiables; y (d) el experto ha aplicado de manera confiable los principios y métodos a los hechos del caso (U.S. Government, 2014).

morfometría geométrica y la estadística multivariante. Con el fin de proponer su aplicabilidad, capacidad de prueba y la asignación de las mínimas tasas de error en su metodología y técnicas en el procedimiento de la identificación facial forense a través de imágenes.

## Objetivos de investigación

- Crear una base de datos con modelos de referencia tridimensionales (3D) de la población mexicana.
- Analizar la variabilidad de la forma facial simétrica y asimétrica de la población por regiones: norte, occidente, centro y suroeste de México.
- Evaluar si existen patrones biogeográficos en relación con los espacios de forma faciales analizados.
- Identificar componentes clave de la morfología facial de la población mexicana.

## Hipótesis de investigación

Se espera hallar una correlación estadísticamente significativa de la variación geoespacial y los patrones de variación de la forma facial, en función de la distancia geográfica de las distintas regiones de la República Mexicana.

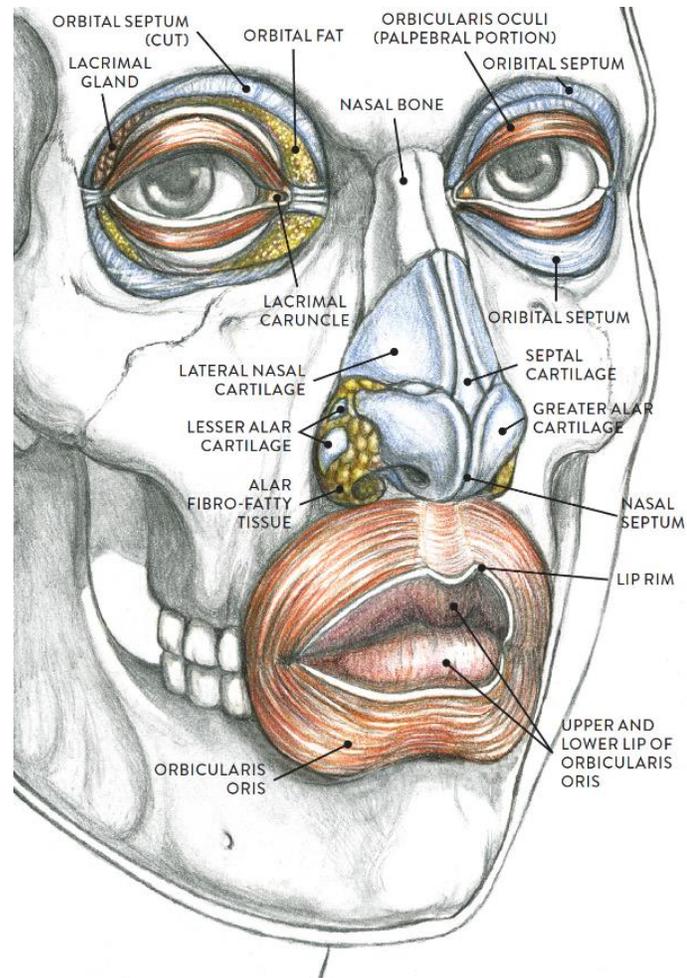
Capítulo 2:  
MARCO TEÓRICO–CONCEPTUAL

## Somatología facial

Anatómicamente la cara se sitúa en el cráneo y puede describirse mediante el tejido óseo conformado por dos grupos de huesos. La serie superior de huesos los constituyen los que forman la bóveda craneal que contiene y protege al encéfalo. Los otros huesos forman el esqueleto de la cara. En total suman 22 huesos del cráneo, de los cuales 21 se sueldan durante el crecimiento en tenues líneas articulares denominadas suturas. La mandíbula permanece sin soldarse y se articula con el resto del cráneo mediante dos articulaciones temporomaxilares (Parker et al., 2007). El esqueleto de la cara está formado por 13 huesos, de los cuales sólo uno es impar, el vómer. Los restantes son pares y laterales, y se sitúan simétricamente a ambos lados de la línea media. Estos son los maxilares, lagrimales, palatinos, cornetes, nasales y los cigomáticos. Y por último, la mandíbula (Schwartz, 2007).

Para mover partes de la cara como cejas, párpados y labios, interactúan los músculos de la cara con el cráneo y vértebras del cuello. Esta compleja musculatura permite la variedad de expresiones faciales. Algunos de los músculos faciales se adhieren a huesos, y otros a tendones o a grupos densos o laminares de tejido conjuntivo fibroso llamado aponeurosis. Esto significa que algunos músculos faciales están unidos entre sí. Muchos de estos músculos tienen su otro extremo insertado en las capas profundas de la piel. Este complejo sistema hace que una ligera contracción mueva la piel facial, la cual se convierte en una expresión emotiva. La mayor parte de los músculos faciales están controlados por el nervio facial llamado nervio craneal VII. Esto se sabe debido a que las afecciones o lesiones de este nervio se traducen en pérdida de movilidad facial y de la capacidad de expresión (Parker et al., 2007).

El tejido conjuntivo dérmico y adiposo junto con los músculos se le denomina tejido blando, para describirlo, este se divide en tercio superior, tercio medio y tercio inferior. El grosor del tejido blando no es uniforme en toda la cabeza, varía de acuerdo con las estructuras que cubra como, por ejemplo, las cartilagosas como la nariz y la oreja son altamente adherentes, pero en otras áreas son gruesas como los labios, y delgadas en los párpados. Un aspecto importante del tejido blando es que su crecimiento no sigue el crecimiento del tejido duro (óseo) subyacente, esto es que el crecimiento del tejido blando es independiente. De hecho el crecimiento del tejido duro depende del crecimiento del tejido blando (Premkumar, 2011). El tercio superior de la cara logra su crecimiento total a los 12 años. El tercio medio e inferior se desarrollan durante la adolescencia.

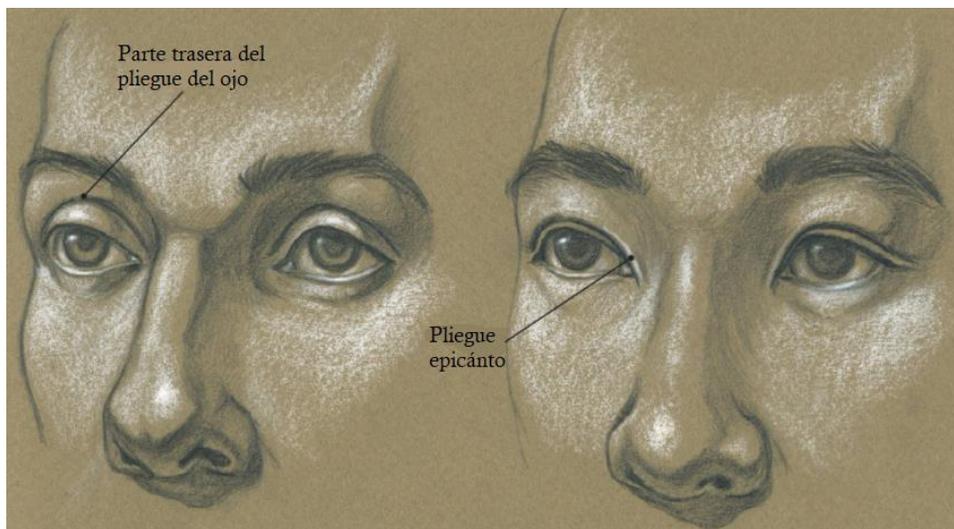


**Figura 1.** Estudio anatómico de

la cara.  
Se señalan distintos tejidos que componen la cara.  
Imagen tomada de (Winslow, 2015)

## Los párpados

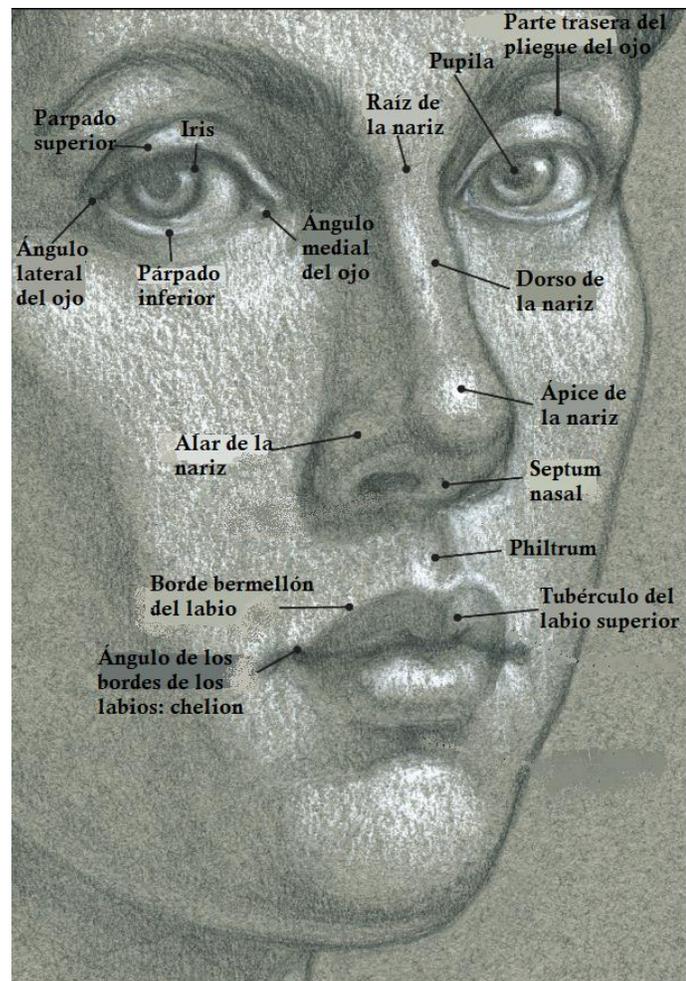
El ojo se encuentra suspendido dentro de la cuenca orbital por una serie de músculos delgados y amortiguados por grasa, ver Figura 1. Existen muchas variaciones sutiles en la forma en que los párpados se envuelven sobre la parte frontal del globo ocular. Esto depende de cómo las almohadillas de grasa que rodean el ojo influyen en los párpados. En algunos ojos hay un pliegue superior y paralelo a la curva del ojo, identificado como *pliegue de la parte posterior del ojo*. A medida que se cierra el párpado superior este pliegue desaparece temporalmente y regresa cuando se abre el párpado, ver Figura 2. En cambio, otros ojos tienen un tipo diferente de estructura del párpado superior, llamado *pliegue epicánto*. Cae cerca del borde del párpado superior y cubre parcialmente la esquina interna del ojo, ver Figura 2. Las almohadillas de tejido graso suavizan la región de los párpados superior e inferior. Existen innumerables variaciones de estos pliegues oculares en todo el mundo (Winslow, 2015). El epicánto se asocia a menudo con individuos de ascendencia asiática, aunque puede ocurrir en personas de cualquier ascendencia. “Se ha observado este tejido ocular en individuos de origen europeo y de origen africano, y a menudo se observa en los ojos de los niños” (Taylor, 2000).



**Figura 2.** Dos tipos de plegados de ojos. A la izquierda el pliegue es paralelo a la curva del ojo. A la derecha el pliegue está cerca del borde del párpado superior, cubriendo parcialmente la esquina interna del ojo. Imagen tomada de (Winslow, 2015).

El ángulo interno del ojo, llamado *ángulo medial del ojo* tiene una depresión triangular extremadamente pequeña que contiene una estructura carnosa rosada llamada *carúncula lagrimal*. La esquina exterior del ojo, donde se unen los párpados superior e inferior, se llama *ángulo lateral del ojo*. El iris es el disco coloreado del ojo. En el centro el iris está la pupila, una apertura que fluctúa en tamaño, como se ve en la Figura 3.

Las características anatómicas que determinan el cambio de la forma del párpado del ojo incluyen la posición y el contorno del párpado superior e inferior. La posición del ángulo lateral del ojo y la posición del ángulo interno del ojo. También, el tamaño del globo ocular, el tamaño de la cuenca orbitaria y la cantidad de grasa o depresiones presentes alrededor de los ojos.



**Figura 3.** Vista de la cara del en tres

cuartos. Se señalan algunos puntos de la región de los ojos, nariz y boca. Imagen tomada de (Winslow, 2015).

## La nariz

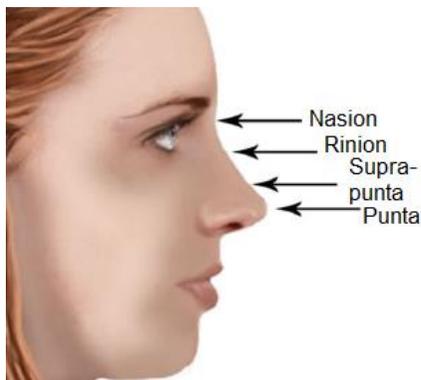
La nariz es un rasgo facial importante para la identificación de personas y también se considera un rasgo estético. Juega un papel importante en las funciones vitales de la respiración y el olfato. Es un órgano tridimensional complicado, con varias convexidades y concavidades debido a las características distintivas del tejido blando subyacente, lo que resulta en diferencias de forma y apariencia. En su estructura, los huesos frontal, nasal y maxilar participan en la formación de la nariz y la mayor parte de su apariencia externa está formada por las estructuras de tejido blando subyacentes en el lugar de los huesos. Cada uno de los dos huesos nasales se emparejan en el proceso ascendente del maxilar y forman la bóveda ósea (tercio superior) de la nariz. En la sutura nasofrontal, los huesos frontales se fusionan con el hueso frontal; a esto se le llama nasion. La nariz está compuesta externamente por la raíz, la punta del dorso y la columela (la parte entre las fosas nasales), mientras que las otras partes de la nariz están compuestas por el ala, el surco alar y las fosas nasales, ver Figura 1 y 3 (AlJulaih et al., 2020).

Un estudio realizado durante nueve años con niños concluyó que el aumento en la longitud facial total recibe una contribución importante del aumento de la longitud media de la nariz de aproximadamente 1.5 mm por año y el aumento en el ancho de la nariz es de aproximadamente 0.5 mm por año. (Prahl-Andersen et al., 1995). Análisis de los cambios de crecimiento en el perfil del tejido blando en individuos de 7 a 17 años, mostraron un aumento superior en la altura de la nariz en los hombres más que en las mujeres. La altura de la nariz alcanzó su máximo valor conservado en la edad adulta alrededor de los 15 años para las mujeres y 18 años para los hombres (Nanda et al., 1990). En última instancia, la proyección nasal en los hombres es mayor que en las mujeres porque los hombres continúan mostrando crecimiento incluso después de que las mujeres han dejado de crecer. La profundidad de la nariz alcanza el 85 por ciento del valor adulto para los hombres a los 17 años, y casi el 90 por ciento del valor adulto para las niñas de la misma edad (Nanda et al.,

1990). El crecimiento sagital del tejido blando de la nariz es independiente del esqueleto subyacente y continúa creciendo incluso después de que se completa el crecimiento del esqueleto, esto es en la etapa de envejecimiento.

Para realizar una descripción de la estructura y forma de la nariz, en vista de perfil, se recurre a la descripción de los distintos tipos de dorsos que ella presenta. Para hacerlo, se tiene que en la Figura 4a, está el nasión, el área más profunda del ángulo fronto-nasal; el *rhinion* en la zona de union de los huesos propios con los cartilagos laterales superiores; la suprapunta un área levemente deprimida antes de la punta nasal, que otorga naturalidad al dorso; y finalmente, la punta nasal. En la Figura 4b, se observan los distintos tipos de dorso que forma la suprapunta de la nariz; y también la descripción de la base de la nariz según la posición de la punta.

a)



b)

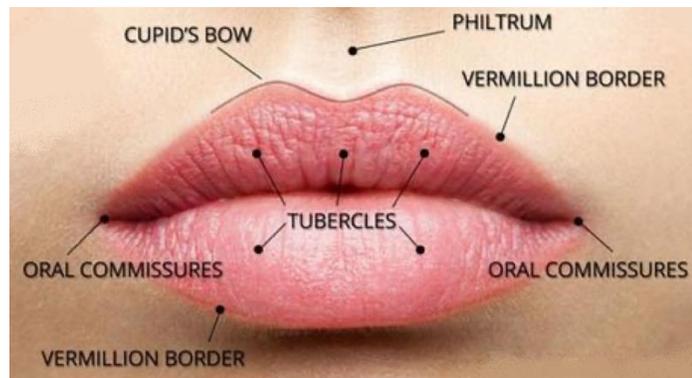


**Figura 4.** Perfil nasal. a) Esquema perfil nasal. b) formas del dorso y base de la nariz de perfil.

## Los labios

Los labios superior e inferior son en realidad parte del músculo *orbicularis oris*, como se observa en la Figura 1. Los labios superior e inferior pueden ser gruesos, delgados, angulosos y tensos. También pueden ser anchos o estrechos, proyectados o retrusivos. Al estudiar los labios, se toman en cuenta los siguientes puntos: longitud, grosor, arco de cupido y perfil. La posición de los labios depende de las estructuras esqueléticas subyacentes. Cuando los procesos alveolares y los dientes se vuelven protrusivos, también lo hacen los labios y viceversa. En el centro del labio superior, una pequeña proyección llamada tubérculo del labio superior contiene una pequeña cantidad de tejido graso que ayuda a crear su forma. Este tubérculo puede ser bastante prominente o muy sutil. Rodeando el labio superior en el borde bermellón de los labios hay un vértice sobre la cresta, debajo de la depresión del philtrum, llamada crista philtre, la cual dibuja un arco de cupido (Winslow, 2015), ver Figura 5.

El crecimiento de los labios sigue el crecimiento general del cuerpo con los tejidos blandos y musculares. Los labios tienden a crecer a un ritmo gradual hasta los 15 años, después disminuye la tasa de crecimiento. El grosor promedio de los labios superior e inferior es de 11.5 y 12.5 mm respectivamente. Hasta la edad adulta, los labios superiores parecen cubrir alrededor del 60 al 65 por ciento de la longitud de los incisivos superiores y los labios inferiores cubre el resto. Se encontró que el aumento en el grosor del labio fue mayor en hombres que en mujeres. El valor máximo en el grosor del labio para las mujeres se alcanzó a los 13 años y para los hombres a los 18 años (Premkumar, 2011).



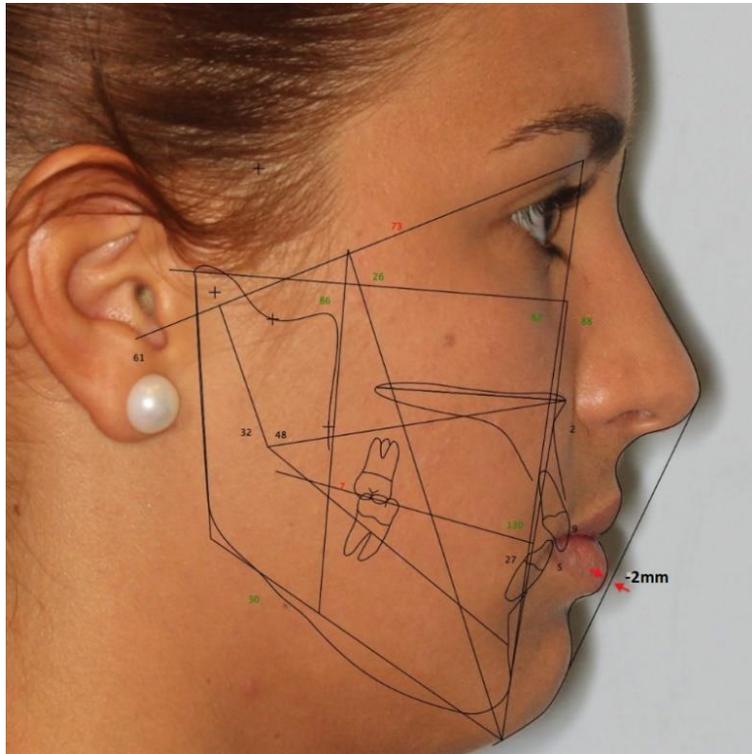
**Figura 5.** Descripción de los labios.

## Tipos de perfil facial

Los cambios de perfil facial durante el crecimiento son diferentes para los tejidos óseos y blandos. Con el crecimiento continuo de la barbilla y el perfil del tejido blando permanece ligeramente convexo debido al crecimiento continuo de la nariz. Esta es una instancia para demostrar que el crecimiento de los tejidos blandos es en gran medida independiente del crecimiento esquelético (Premkumar, 2011). La prominencia del mentón de los tejidos blandos depende del mentón esquelético subyacente. La barbilla vista de perfil en el tejido blando es más prominente en hombres que en mujeres. Sin embargo, el grosor del mentón de los tejidos blandos varía con cada tipo de rostro.

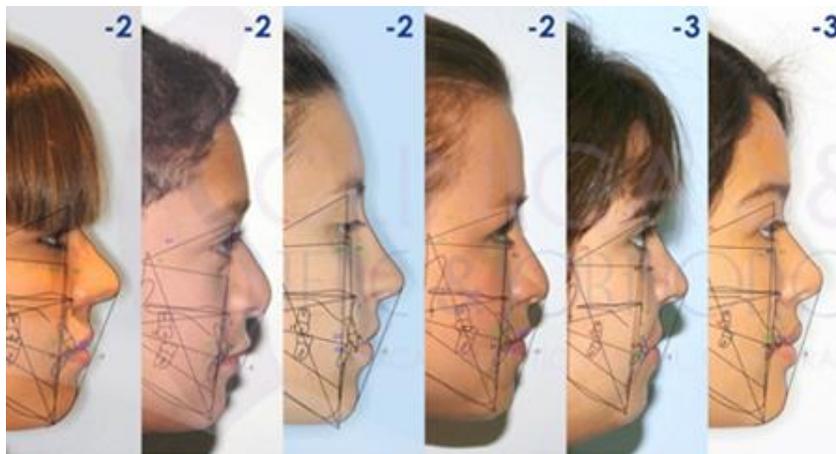
Se describe el tipo de perfil facial con la posición anteroposterior de los maxilares para comprobar si están situados en forma proporcional en sentido horizontal. Con esto se valora la posición de los labios y el grado de inclinación de los dientes anteriores (incisivos). La posición de los labios depende de la inclinación que tengan los dientes anteriores. Si los incisivos están inclinados los labios tendrán una posición protrusiva y si están retroinclinados los labios estarán retrusivos.

En la práctica de la ortodoncia, para evaluar el perfil, se traza una línea vertical que pase por la punta de la nariz y la punta del mentón que se conoce como *Plano estético de Ricketts*. Se mide la distancia que hay entre el labio inferior y el plano estético, que debe ser de menos de 2mm, ver ejemplo en la Figura 6. Esta medida indica el balance que existe entre el perfil y el labio inferior (Feregrino Vejar et al., 2016):



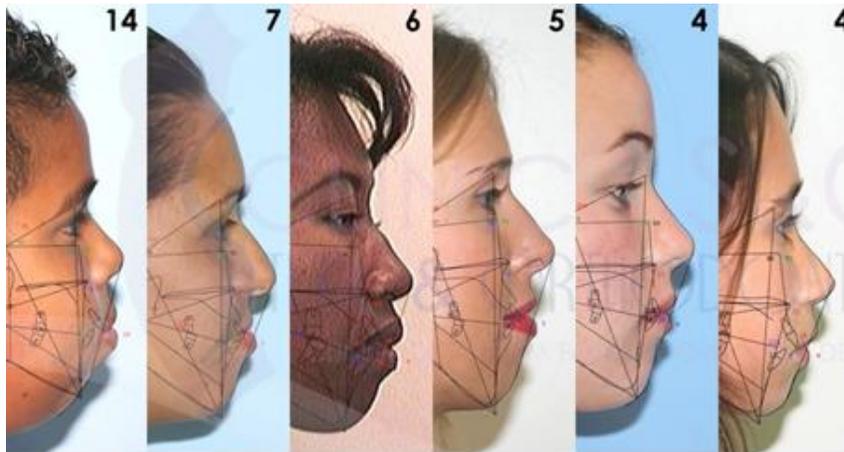
**Figura 6.** Plano estético de Ricketts. Valoración de perfil facial con la distancia de los labios a la línea E (plano estético) estética de Ricketts, la norma es de 2mm detrás de esa línea. Imagen tomada de (Clínica S&O, 2020).

➤ Si el labio está en menos de 2mm es un perfil recto, ver ejemplo en la Figura 7.



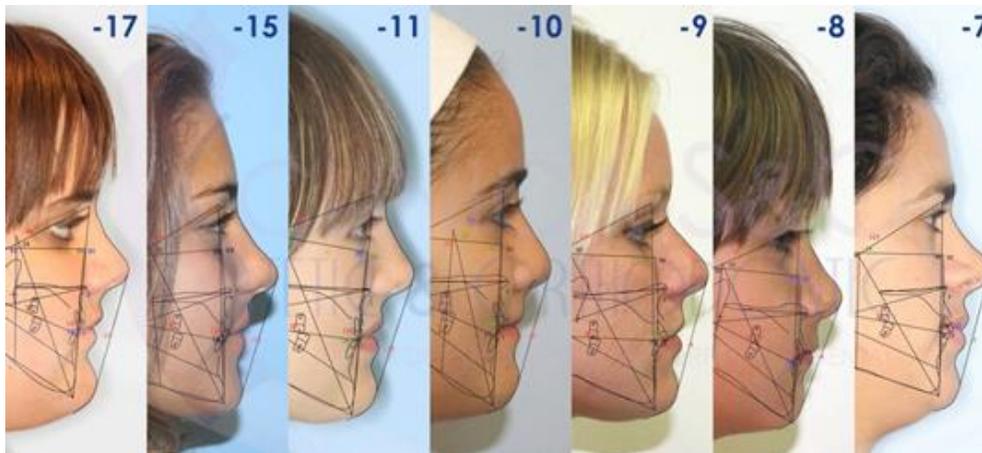
**Figura 7.** Perfil recto. Imagen tomada de (Clínica S&O, 2020).

- Si el labio está por delante de la línea es un perfil convexo, ver Figura 8.



**Figura 8.** Perfil convexo. Imagen tomada de (Clínica S&O, 2020).

- Si el labio está por detrás de la línea es un perfil cóncavo, como en la Figura 9.

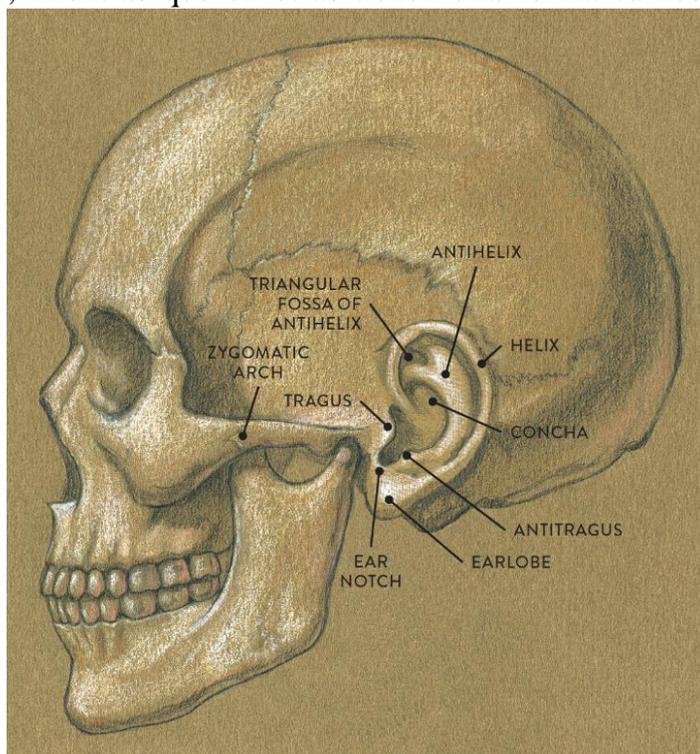


**Figura 9.** Perfil cóncavo. Imagen tomada de (Clínica S&O, 2020).

## Las orejas

Las orejas pueden reposar contra la cabeza o proyectarse hacia afuera. Pueden ser pequeñas o grandes, angulares o curvas. Sus formas tubulares pueden ser gruesas o delicadas. La estructura de la oreja se compone principalmente de cartílago, mientras que el lóbulo de la oreja contiene tejido graso fibroso (Winslow, 2015).

La forma de la oreja consiste en una estructura en forma de cuenco llamada concha, y formas tubulares en espiral que se adhieren alrededor y dentro del cuenco. El borde tubular exterior se llama hélix y el borde tubular interior se llama antihélix. A medida que el antihélix se desplaza hacia el lóbulo de la oreja, se ve un pequeño bulto llamado antitragus, ver Figura 10. Delante del canal auditivo hay una pequeña forma de cartílago que sobresale llamada trago. Los lóbulos de las orejas, en algunos casos apenas se pueden detectar, mientras que en otras tienen una forma carnosa evidente. Algunos lóbulos de las orejas pueden ser bastante alargados, esto puede ser el resultado del proceso de envejecimiento o de que el lóbulo se estire con aretes pesados o tapones en forma de disco insertados en el lóbulo (Winslow, 2015). La oreja se coloca sobre el canal auditivo al final del arco cigomático como se observa en la Figura 10.



**Figura 10.** Vista lateral del cráneo, formas de la oreja y su posición en el cráneo. Imagen tomada de (Winslow, 2015).

## Altura y anchura de la cara

La longitud de la cara aumenta desde la infancia hasta la adolescencia. La longitud facial aumenta en un 22.7 por ciento en las mujeres y en un 25 por ciento en los hombres. El aumento en el ancho de la cara es mayor en las mujeres que en los hombres, un promedio de 1 mm por año. La anchura bizigomática aumenta aproximadamente 9.5 por ciento en las mujeres y 8.8 por ciento en los hombres (Premkumar, 2011). Los cambios corporales están relacionados con otras partes del cuerpo, por ejemplo existe una correlación entre la estatura, el tamaño facial y la longitud mandibular en la pubertad. Es en la adolescencia donde se presentan las evidencias de un marcado dimorfismo sexual de la cara (Mellion et al., 2013).

## Envejecimiento facial

Como se ha visto los cambios más drásticos de la cara ocurren en el periodo de la adolescencia. La adolescencia o pubertad es el período de la vida que conduce a la edad adulta a través de cambios fisiológicos y psicológicos dramáticos. La adolescencia o la pubertad es también ese período de desarrollo durante el cual los mamíferos suelen adquirir su capacidad reproductiva. Las alteraciones estructurales somáticas del cuerpo generalmente ocurren en sincronía con sus cambios fisiológicos. La adolescencia se caracteriza por una mayor tasa de crecimiento en prácticamente todos los huesos y músculos del cuerpo. La composición del cuerpo y la cara cambia dramáticamente durante la adolescencia. El parámetro de la tasa de crecimiento y el desarrollo del esqueleto facial es comparable con el del esqueleto somático. Sin embargo, solo hay un aumento modesto en el crecimiento del maxilar durante la pubertad. La cara alcanzaría un aspecto adulto después de este periodo, y será entre los 18 a 20 años. Después del pico de crecimiento en la pubertad las estructuras faciales están en maduración y comienza el envejecimiento (Mellion et al., 2013). La aparición del envejecimiento facial es causada por el desgaste del volumen de los tejidos blandos, además de la pérdida de soporte y elasticidad. Existe proyección

deficiente del maxilar, depresión del lagrimal y el parpado (Levine et al., 2003). Se sabe que las transformaciones relacionadas con la edad son causadas principalmente por cambios en los tejidos blandos durante la edad adulta (Imai & Okami, 2019). El adelgazamiento epidérmico y la disminución de la producción de colágeno hacen que la piel pierda elasticidad. Además, la pérdida de grasa junto con la gravedad y el tirón muscular provocan las arrugas y la formación de líneas dinámicas. Y se ha demostrado que el proceso de envejecimiento afecta los huesos de la cara, como la órbita y en el tercio medio hay un proceso de contracción (Kahn & Shaw, 2010).

## Evolución de la cabeza humana

El *Homo sapiens* evolucionó en África entre 300 y 200 mil años (D. Lieberman, 2011). Los análisis genéticos estiman que el evento de divergencia más antiguo ocurrió hace 140 mil años (Shriner et al., 2014) y muestran que los pueblos con sus genes han irradiado en múltiples migraciones fuera de África hacia los demás continentes del planeta (Chan et al., 2019). Dispersándose por Oriente Medio a partir de unos 100 mil años. Y luego por Europa y Asia entre 60 y 40 mil años. Estos humanos modernos sustituyeron a todas las demás especies de *Homo*; aunque los neandertales (desaparecidos hace 30,000 años) comparten más variantes genéticas con los humanos actuales en Eurasia que con los humanos actuales en el África subsahariana (Green et al., 2010). Los humanos se han vuelto menos robustos desde el final de la Edad de Hielo (D. Lieberman, 2011), por lo tanto, se hace la distinción entre el *H. sapiens* temprano que es más robusto; en comparación con el *H. sapiens* reciente, el cual es más grácil. Aunque la mayoría de los rasgos relacionados con la gracilidad son muy variables. Como muchos de los rasgos que diferencian los cráneos de *H. sapiens* de distintas partes del mundo son también recientes, variables y sutiles.

Las características anatómicas de la forma de la cabeza del *Homo sapiens* difiere de los demás homínidos en dos grandes diferencias. La primera es, que el *H. sapiens* tiene una bóveda craneal esférica (globular). La esfericidad neuro craneal da lugar a un conjunto integrado de rasgos derivados de la bóveda craneal, entre los que se incluyen unos parietales largos, anchos y muy curvados tanto en el plano sagital como en el coronal; una región occipital larga y que no se proyecta mucho hacia atrás; y un hueso frontal que se eleva de forma pronunciada por encima de las órbitas. La segunda diferencia deriva en que la cara del *H. sapiens* está retraída en su mayor parte por debajo de la fosa craneal anterior, lo que hace que la cara sea más pequeña (especialmente más corta anteroposteriormente); y la base craneal está más flexionada. Esta retracción facial da lugar a un arco superciliar débil, una fosa canina distinta, un espacio reducido para la región orofaríngea, una cavidad oral con lengua

corta y redonda y las cavidades orbitarias más anchas que altas (D. Lieberman, 2011). Otro rasgo derivado importante y único es el mentón (Lam et al., 1996) (Schwartz & Tattersall, 2000). Efectos derivados de la cabeza del *H. sapiens* probablemente afectaron también el rendimiento locomotor, pues una cara más pequeña y menos prolija hacen más equilibrado el centro de gravedad y una mayor estabilidad de la cabeza, lo que sugiere una excelente capacidad de resistencia en una carrera (D. Lieberman, 2011).

Además de volverse más gráciles, los humanos recientes también experimentaron cierta diferenciación regional desde el Pleistoceno. En general, los asiáticos orientales tienen caras algo más planas y altas que otras poblaciones. Los europeos tienden a tener una región nasal superior más saliente, junto con mandíbulas más retraídas y estrechas. Los australo-melanesios tienden a tener un frontal relativamente estrecho combinado con una cara ancha y ligeramente saliente. Los africanos son muy diversos, pero suelen tener una base craneal estrecha (anchura biporiónica) combinada con una parte media de la cara estrecha, una escama frontal convexa, una región glabellar pequeña y una cara corta. Los nativos americanos, también muy diversos, tienden a tener una base craneal y una bóveda cortas y anchas, una parte inferior de la cara ancha y una silla nasal prominente. Un hecho clave es que la mayoría de estas diferencias tienen menos de 10,000 años de antigüedad (Foley et al., 1992). Los rasgos craneales que hacen que las personas de diversas partes del mundo parezcan diferentes no son muy antiguos. Otra idea importante es que la mayoría de los cambios recientes no indican fuertemente los efectos de la selección natural. En cambio, varias líneas de evidencia sugieren que los procesos de evolución neutral, como la deriva y el flujo genético aleatorio, pueden explicar la mayor parte de la variación fenotípica entre los cráneos humanos recientes.

En la teoría sobre la evolución humana es un hecho importante que más del 85% de la variación genética de la especie humana existe dentro de una población determinada (Lewontin, 1972). Del mismo modo, alrededor del 80-90% de la

variación craneofacial está presente dentro de una población determinada (González-José et al., 2004; John H. Relethford, 1994; Roseman & Weaver, 2004); no obstante, existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las poblaciones para algunos aspectos de la forma del cráneo, sobre todo en la cara (González-José et al., 2004) y es así como se diferencian las poblaciones unas de otras. Y autores encontraron que la mayor parte de la variación craneofacial parece reflejar los efectos de un cambio evolutivo neutro en lugar de la selección natural (Roseman, 2004; Roseman & Weaver, 2004, 2007). Otra línea de evidencia que refleja los bajos niveles de selección natural sobre la variación craneofacial es la alta correspondencia entre las medidas de diferencia genética y craneofacial entre las poblaciones, indicando que la varianza fenotípica se mapea bien con la varianza genética (González-José et al., 2004; Harvati & Weaver, 2006). Otros autores, han propuesto que la distancia geográfica a lo largo de las masas terrestres es un adecuado proxy para cuantificar el papel relativo de la deriva génica frente a la selección natural en el estudio de la variación craneofacial. Sin embargo, antropólogos han demostrado que los procesos neutrales han sido mucho más importantes que el clima en la configuración craneofacial humana. Además, en condiciones de evolución neutra, es de esperar que se produzcan niveles más bajos de variación debido a la deriva y a los efectos del pequeño tamaño de la población. Curiosamente, las medidas de variación intragrupo en el cráneo son más altas en África y se reducen a medida que aumenta la distancia geográfica de África (Manica et al., 2007) como es en el caso del genotipo (Prugnolle et al., 2005; Spencer, 2003) .

Sin embargo, las poblaciones humanas en todo el mundo varían mucho en la morfología craneofacial. Y es muy debatido hasta qué punto esta variabilidad se ha acumulado a través de procesos neutrales como la deriva genética o mediante la selección natural impulsada por el clima (Betti et al., 2010; Harvati & Weaver, 2006). Por ejemplo, las razones evolutivas de la variación en la forma de la nariz entre las poblaciones humanas han sido objeto de un debate continuo. Una función importante

de la nariz y la cavidad nasal es acondicionar el aire inspirado antes de que llegue al tracto respiratorio inferior. Por esta razón, se cree que las diferencias observadas en la forma de la nariz entre las poblaciones no son simplemente el resultado de la deriva genética, sino que pueden ser adaptaciones al clima (Shea, 1977; Yokley, 2009). Un estudio reciente indica que la fosa nasal interna es el único componente del complejo nasal que demuestra un patrón ecogeográfico de variación consistente con la adaptación a las condiciones climáticas. De hecho, sus resultados sugieren que la pirámide externa de la nariz y la nasofaringe prácticamente no exhiben evidencia de morfología mediada por el clima, y que las asociaciones aparentes entre el clima y la abertura nasal están influenciadas por las proximidades geográficas (y probablemente genéticas) de ciertas poblaciones. En consecuencia, dicho estudio indica que el complejo nasal, en su conjunto, no presenta señales climáticas. Más bien, la morfología adaptativa al clima parece restringida al área de la fosa nasal interna responsable del intercambio de calor y humedad respiratoria (Maddux et al., 2017). Por lo tanto, demuestran que una nariz externa proyectada no es una adaptación universal a los climas fríos y/o secos entre los humanos modernos. Otros estudios comprobaron que la morfología facial se ve fuertemente afectada por las condiciones climáticas que otras partes del cráneo, especialmente en latitudes altas (Evteev et al., 2014; Lacruz et al., 2019). Alternativamente, otros proponen que la distribución circunscrita de una nariz externa proyectada podría reflejar los efectos de la deriva genética o la selección sexual (Maddux et al., 2017; Zaidi et al., 2017) en lugar de una adaptación climática.

Existen otras adaptaciones ambientales que afirman que parte de la disminución del tamaño facial sea por la masticación de alimentos más blandos y procesados lo que genera menos crecimiento en la parte inferior de la cara (González-José et al., 2005; D. E. Lieberman et al., 2004). Es razonable plantear la hipótesis de que la cocción y otras tecnologías de procesamiento de alimentos liberaron la necesidad de tener un rostro alto, profundo y ancho para resistir tensiones masticatorias altas y

frecuentes. La cocción hace que la mayoría de los alimentos sean considerablemente más blandos y tiernos; además, las técnicas de procesamiento, como el machacado y la molienda, reducen el tamaño de las partículas de los alimentos y su dureza. Como resultado, los humanos que cocinan y procesan sus alimentos generan mucha menos carga, tanto en términos de magnitud como número de ciclos. Sin embargo, no se puede caer en un reduccionismo, puesto que la historia de la humanidad va más allá de la acción de fuerzas evolutivas. En la diversidad humana intervienen además aspectos sociales, culturales e históricos que también complejizan la variabilidad genética y morfológica de la multitud de poblaciones alrededor del mundo.

## Modelo de biodistancia aplicado al análisis morfológico facial

En la antropología biológica, los estudios de biodistancias emplean rasgos cuantitativos observados en el cuerpo o en el esqueleto humano para medir el grado de divergencia de la población entre grupos separados por el tiempo y/o la geografía mediante métodos estadísticos multivariados (Buikstra et al., 1990; Marin A. Pilloud, 2016). La craneometría y la morfometría clásica eran instrumentos para los estudios de biodistancias con lo que se estimaban las diferencias fenotípicas entre las poblaciones humanas a partir de la variación morfológica, cuya información se observaba en su filogenia (North et al., 1999). Cuando se estudia la biodistancia a partir de la variabilidad morfológica, algunas variables que se analizan están correlacionadas por el espacio, debido a que las poblaciones geográficamente próximas tienden a ser biológicamente similares. Esta correlación espacial puede ser debida al flujo génico entre las poblaciones locales, dada la tendencia de que la migración está limitada en función de la distancia geográfica (Sokal, Jacquez, & Wooten, 1989; Robert R. Sokal & Oden, 1978).

Como fundamento teórico es pertinente tomar como referente los modelos de biodistancia en los análisis morfológicos. Estos en sus inicios se aplicaron al estudio de la variabilidad de la morfología craneal y se sustentan sólidamente en la teoría de la genética de poblaciones. El pensamiento evolutivo de la genética de poblaciones trata de caracterizar y establecer diferencias dentro de los organismos dentro de una misma especie; para ello es necesario analizar los genes dentro de las poblaciones (Hedrick, 2005). Los estudios de estructura genética son de relevancia porque permiten establecer estimaciones más o menos fiables de las relaciones genéticas existentes entre y dentro poblaciones como flujo génico, deriva génica, selección natural y mutación (Hedrick, 2005). Los análisis de la estructura genética de las poblaciones humanas son esclarecedores, dan una visión biológica de la historia de la especie a lo largo de decenas de miles de años, nos muestran que los genes y sus poblaciones han irradiado en una serie de migraciones. Sabemos que heredamos

características físicas de nuestros padres, lo que crea un componente genético en nuestra apariencia física. A medida que las personas se mueven en el paisaje, pueden intercambiar rasgos genéticos con otras poblaciones creando una superposición en las estructuras genéticas entre los grupos. También los cuerpos se adaptan para garantizar la sobrevivencia y reproducción. Fuerzas genéticas, ambientales y culturales se expresan en rasgos físicos que crean patrones geográficos en la variación humana.

Así que, también se puede estudiar a la estructura poblacional no sólo por sus genes, sino por sus características fenotipo morfológicas. Si es posible conocer la estructura genética poblacional en función del espacio habitado, también la morfología puede reflejar una ascendencia compartida de un grupo que conllevan un efecto fundador y la dispersión hacia una nueva área. Las características de la estructura genética pueden ser halladas, pero también algunas de estas características se observan en el fenotipo de la población como resultado de la actuación de las fuerzas evolutivas en entornos espacialmente cercanos o ecológicamente similares (Relethford, 2008, 2009).

Bajo la perspectiva del modelo de aislamiento por distancia, aquellos individuos cercanos geográficamente tendrán similitudes genéticas y fenotípicas que pueden ser tomadas como modelo para inferir la ancestría y/o origen de un individuo no identificado (ancestría biogeográfica<sup>2</sup>). Los análisis de distancias han sido herramientas comunes en biología de poblaciones, donde se han propuesto varias medidas de distancia para examinar la disimilitud genética y/o fenotípica entre pares de poblaciones (Sneath & Sokal, 1973). El examen de las distancias entre todos los pares de poblaciones en un análisis puede proporcionar información sobre la estructura y la historia de la población. Existen medidas de distancias puramente genéticas y otras son de naturaleza fenotípica, las cuales se les denomina biodistancias. Cuando se utilizan las biodistancias para abordar cuestiones de

---

<sup>2</sup> El cálculo de la ancestría biogeográfica a través de caracteres morfológicos tiene la posibilidad de definir una probabilidad asociada a la pertenencia de una persona a un grupo poblacional determinado.

estructura, origen e historia de la población, se está tomando el fenotipo como un sustituto de los patrones subyacentes de afinidad genética. Es decir, si se encuentra que las poblaciones A y B son fenotípicamente más similares (menos distantes) entre sí que la población C, se infiere que las poblaciones A y B son genéticamente más similares entre sí que cualquiera de ellas a la población C. La causa de esta similitud podría ser un ancestro común, el flujo de genes o algún otro factor (J. H. Relethford, 2016). Para saber cómo esto sucede se utiliza el modelo teórico de aislamiento por distancia<sup>3</sup> de la genética de poblaciones. Por lo tanto, existe un vínculo entre la genética de poblaciones y las biodistancias que implica también la estimación de parámetros específicos, como  $F_{st}$  que es una medida de flujo de genes y deriva genética entre un conjunto de poblaciones cruzadas en un solo punto en el tiempo. En cambio, la distancia generalizada de Mahalanobis es más atractiva intuitivamente, ya que extiende el concepto de distancia euclidiana a un caso en que se tienen en cuenta la intercorrelación de rasgos a un nivel multivariante. Para aplicaciones que se enfocan en una evaluación general del patrón de relación entre poblaciones, la distancia de Mahalanobis es suficiente, además que se puede utilizar esta matriz de distancia con una amplia gama de métodos clásicos. Y el método gráfico, como el análisis de conglomerados se pueden utilizar para producir “mapas” de distancia que muestran visualmente la relación de las poblaciones entre sí. Además, la distancia generalizada de Mahalanobis, está basada en la idea de que la similitud fenotípica refleja relaciones genéticas (J. H. Relethford, 2016).

Por ejemplo, se ha revelado que gran parte de la variación craneométrica humana sigue un modelo neutral de relaciones de población. Y al mismo tiempo, existe evidencia de la influencia de la selección natural en haber dado forma a cierta diversidad global en el cráneo (John H. Relethford, 2010).

---

<sup>3</sup> El aislamiento por distancia ocurre cuando la dispersión reproductiva está limitada por la distancia y produce un cambio continuo en las frecuencias alélicas, el más cercano geográficamente es el más cercano genéticamente (Solano et al., 2010).

Por lo tanto, si se quiere estudiar la variabilidad fenotípica se recurre al análisis de biodistancia y variación biogeográfica, cuyo objetivo es determinar cantidades de variación morfológica dentro y entre las poblaciones (McKeown & Jantz, 2006). Se utiliza el término de biodistancia en referencia a los análisis que estiman diferencias y niveles de variabilidad a partir de caracteres morfológicos, con el único fin de diferenciarlas de las distancias genéticas, obtenidas a partir del DNA o las proteínas (Buikstra, Frankenberg & Konigsberg, 1990). En estos estudios de biodistancia se busca estimar la importancia relativa de fuerzas evolutivas como la deriva genética, la selección natural, el flujo génico y la influencia de la separación geográfica y otros mecanismos de aislamiento (Relethford & Blangero, 1990). Las investigaciones en biodistancia proveen un contexto adecuado para estimar la variabilidad morfológica poblacional (Buikstra et al., 1990). Se busca analizar los rasgos morfológicos a través de las lentes de la teoría evolutiva y la variación biogeográfica, teorías fundamentales de la antropología biológica.

El cálculo de las biodistancias se logra con métodos estadísticos multivariados que permiten el acercamiento al análisis morfológico. La importancia epistemológica de esto, radica en que se trata de cambios conceptuales (González, Escapa, Neves, Cúneo, & Pucciarelli, 2011), puesto que se utilizan algunas herramientas metodológicas de la genética de poblaciones. Este tipo de análisis de biodistancia y biogeografía es utilizado no como una clasificación de tipología racial (Quinto et al., 2015), sino como material para estimar y comparar patrones de variabilidad morfológica dentro y entre poblaciones.

## Morfometría Geométrica 3D

La morfometría es una rama de la biología encargada de caracterizar la forma de los organismos y cuantificar su variación morfológica. La morfometría geométrica es el análisis estadístico de la variación de la forma de los organismos y su covarianza con otras variables. Surge de la unión entre la biología y la geometría (Bookstein, 1991). Su método cuantifica la variación de la forma de los organismos al utilizar coordenadas cartesianas ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) en cada punto anatómico de referencia (Adams et al., 2013). Las ventajas del estudio de variables cuantitativas son que las descripciones que arrojan los análisis (de los datos de las coordenadas) tienden a ser más objetivas que las cualitativas, logrando obtener resultados con una fácil reproducción y replicación. Y, además, permite una adecuada visualización, interpretación y comunicación de los resultados. Estos métodos cuantitativos tienen un poder mayor para detectar diferencias sumamente pequeñas, que si se hiciera con una inspección meramente cualitativa (Benítez & Püschel, 2014). El análisis con morfometría geométrica permite realizar interpretaciones de alto significado bio-antropológico de las diferencias entre individuos o poblaciones y que son relevantes para responder preguntas de investigación.

La definición fundamental sobre la que se basa la morfometría geométrica es la forma (*shape*) como toda información geométrica que resulta de retirar los efectos de la traslación, escala y rotación de un objeto (Kendall, 1977), a través del procedimiento llamado Ajuste Generalizado de Procrustes (AGP). Este método de superposición utiliza matrices ortogonales para hacer coincidir las configuraciones de los puntos de referencia (*landmarks*), esto lo hace por medio de centrar las configuraciones en el origen, los escala al tamaño del centroide y esa configuración la rota de forma iterativa para minimizar la suma de las distancias cuadradas entre los puntos de referencia (Adams et al., 2013; Dryden & Mardia, 2016). El AGP da menos peso a las observaciones que están lejos de la dimensión de una variable media y, por

lo tanto, el análisis será más robusto contra la influencia de individuos fuera de rango. (Klingenberg, 2016).

El método de análisis que sigue la morfometría geométrica sigue tres pasos esenciales: 1) Obtención de los datos que corresponden a los puntos anatómicos (*landmark*) en el espacio definidos una coordenada cartesiana tridimensional (x, y, z), los cuales serán utilizados para el análisis, a este proceso también se le llama fenotipado. 2) Obtención de la información que describe la forma “pura” (*shape*), es decir, la forma de una estructura que será sometida a estudio y está definida por su configuración de landmarks. Los análisis posteriores no se realizan sobre landmarks, sino sobre la configuración completa. 3) Análisis exploratorios y confirmatorios de covariación de la forma con factores causales, esto es la información que describe la forma de estudio y puede ser examinada con análisis de componentes principales, análisis de variantes canónicas, análisis de función discriminante y otros para poner a prueba una hipótesis (Ibacache et al., 2010).

### *Landmarks* faciales

Un *landmark* o loci anatómico es un punto del espacio que tiene un nombre y coordenadas cartesianas (x, y, z), éstas son las que describen su posición en el espacio (Bookstein, 1991). Para la definición de un conjunto de *landmarks* adecuado en el espécimen de estudio, la selección debe seguir el criterio de homología. Las estructuras homólogas son aquellas cuyas semejanzas subyacentes son el resultado de haber sido derivadas de una estructura ancestral común, esto es que pueden ser reconocidos en todos los organismos en estudio (Gilbert, 2005; Oxnard & O’Higgins, 2009). Además, bajo la definición de homología, los *landmarks* tienen que ser discretos, esto significa, que deben ser claramente diferenciables de las estructuras que los rodean

Los *landmarks* deben tener consistencia en la posición, esto es, no alteran su topología de posición respecto de otros puntos. También una cobertura adecuada debe

recrear la morfología del objeto (la cara) en estudio. Deben poder ser hallados persistentemente, ser reproducibles y encontrarse en el mismo plano (Bookstein, 1991; Zelditch, 2004). Los criterios para que un *landmark* sea eficaz es que los puntos puedan ser localizados de manera precisa y consistente en todos los especímenes, para ello un buen conocimiento de la estructura a analizar es importante para elegir la posición de los *landmarks*.

Basado en un criterio anatómico y geométrico Bookstein (1991) desarrolló una clasificación y los enumera en diferentes tipos. Tipo 1: Basado principalmente en las intersecciones anatómicas, tejidos o estructuras. Tipo 2: Corresponde a puntos ubicados en curvaturas máximas o la parte más prominente de una tuberosidad. Tipo 3: son puntos extremos cuya definición está dada por estructuras distantes: diámetros, largos máximos y algunos constructos geométricos. *Pseudo-landmarks*: son constructos definidos por términos matemáticos y anatómicos, como puntos tangentes a una curva. *Semi-landmarks*: son los puntos localizados en una curvatura de acuerdo con la posición de otros puntos o estructuras y que pueden desplazarse levemente en ella.

Escoger los *landmarks* es una tarea importante y difícil al comienzo de un estudio morfológico. Es necesario saber cuántos puntos de referencia se van a usar. Idealmente, el tamaño de la muestra debería ser sustancialmente mayor que el número de *landmarks* incluidos en el análisis (Benítez & Püschel, 2014). Para realizar la caracterización de la cara hay una variación amplia en el número de *landmarks* utilizados en los protocolos de distintas investigaciones, a continuación se enumeran los que existen: set de 14 puntos (Sforza et al., 2014), set de 21 puntos (Toma et al., 2012; Tome et al., 2015), set de 22 puntos (Paternoster et al., 2012), set de 26 puntos (Farrera et al., 2016; Vioarsdóttir et al., 2002), set de 42 puntos (Ercan et al., 2008), set de 53 puntos (Liao et al., 2012), set de 64 puntos (Fink et al., 2005), set de 73 puntos (Fagertun et al., 2015).

## Alometría facial

La medida de tamaño utilizada en morfometría geométrica es el tamaño del centroide (*Centroid Size*), que es la raíz cuadrada de la suma de las distancias al cuadrado entre todos *landmarks* y su centroide. El centroide de una configuración de *landmarks*, es el promedio (media aritmética) de todos los puntos de referencia. Se ha demostrado que el tamaño del centroide no está relacionado con la forma para una pequeña variación isotrópica en cada *landmark* (Bookstein, 1991; Dryden & Mardia, 2016; Mitteroecker et al., 2013).

En el Ajuste Generalizado de Procrustes todas las configuraciones de los *landmarks* del mismo centroide son escaladas al mismo tamaño del centroide y se rotan iterativamente todas las configuraciones hasta que la suma de las distancias cuadradas de los *landmarks* y su media de muestra sea mínima (Mitteroecker et al., 2013). Es decir, una vez obtenido el tamaño del centroide, éste puede ser escalado, de manera de llevar las configuraciones a un tamaño común (Ibacache et al., 2010).

La alometría es la asociación estadística entre el tamaño y la forma; o según Gould (1966): el estudio del tamaño y sus consecuencias (S. J. Gould, 1966). Los estudios morfométricos geométricos de alometría requieren un enfoque metodológico diferente en varios aspectos de los estudios clásicos de alometría. La alometría se expresa como una función lineal de las coordenadas de Procrustes, estimada por una regresión multivariante de las coordenadas de forma sobre el tamaño del centroide (Mitteroecker et al., 2013).

## Regresión multivariante de la forma

Los análisis de la caracterización de la forma se llevan a cabo con el Ajuste Generalizado de Procrustes. Después de realizar el AGP, la información de la forma se proyecta a un espacio tangente donde puede ser estudiada con análisis exploratorios (Ibacache et al., 2010). El primer acercamiento será con el análisis de regresión, este

puede probar la relación entre variables independientes y dependientes. El análisis de regresión descriptivo evalúa el tipo y la fuerza de la relación entre las variables independientes y dependientes con base en el coeficiente de correlación. Si existe una relación sólida, el análisis de regresión también se puede utilizar para generar una ecuación que predice el valor dependiente dadas las variables independientes (McKeown & Schmidt, 2013).

## Morfoespacios: Análisis de Componentes Principales

El Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en *inglés Principal Components Analysis*) es un método para describir la diversidad de formas en una muestra. Se utiliza para simplificar la descripción de la variación entre individuos. Producen puntuaciones para los individuos de esas variables, y estas pueden ser trazadas y utilizadas para inspeccionar patrones visualmente. Como las puntuaciones ordenan a los especímenes según las variables, los métodos se denominan métodos de ordenación. Se espera que la ordenación proporcione una visión de los patrones en los datos, tal vez revelando patrones que son convenientes para abordar cuestiones biológicas. El PCA construye variables que pueden utilizarse para examinar la variación entre los individuos de una muestra (Zelditch, 2004).

Las variables geométricas de la forma no son independientes ni biológica, ni estadísticamente. Las variables de forma producidas por un *wireframe* describen la variación en las regiones superpuestas de un organismo o estructura. Como las regiones se solapan, están bajo la influencia de los mismos procesos que producen la variación y, por tanto, se espera que estén correlacionadas. Incluso cuando no describen regiones que se solapan, se espera que las variables morfométricas estén correlacionadas porque describen características del organismo que están relacionadas funcionalmente, con el desarrollo o genéticamente. Sus patrones de variación y covariación suelen ser complejos y difíciles de interpretar. El propósito del PCA es simplificar esos patrones y hacerlos más fáciles de interpretar sustituyendo las

variables originales por otras nuevas (componentes principales) que son combinaciones lineales de las variables originales e independientes entre sí. Esto con el objetivo de que la nueva variable compleja es una función de las covarianzas entre las variables originales. Por lo tanto, proporciona una visión de las covarianzas entre las variables que puede orientar la investigación futura sobre la identidad de los factores causales subyacentes a esas covarianzas. Otro propósito útil del PCA es que la mayor parte de la variación de la muestra suele describirse con pocos PC. Lo cual simplifica y aclara lo que hay que explicar. Es fácil producir y explicar los gráficos de los tres PC que generalmente explican el 90% de la variación, que trazar y explicar por separado la variación de cada una de las variables originales (Zelditch, 2004).

Dichos resultados suelen presentarse en forma de vectores escalados a la longitud unitaria. Para visualizarse en un morfoespacio donde la variabilidad de la forma captada por el eje del componente principal asociado con la mayor cantidad de variación, normalmente llamado PC1. La posición de los vectores corresponde a la forma de una configuración y puede desplazarse en dirección positiva o negativa a lo largo del PC1 (Slice, 2006).

### La integración morfológica como *proxy* de la variabilidad modular

La integración morfológica describe la variación morfológica coordinada de componentes de un conjunto funcional. Por ejemplo, la covariación sistémica y coordinada de los componentes facial, mandibular y neurocraneal en el cráneo son la base para suponer la integración a nivel funcional y/o de desarrollo. Los estudios de integración morfológica cuantifican, evalúan y comparan patrones y grados de covariación (Bastir et al., 2005). El concepto de integración describe el patrón y la cantidad de correlación entre los rasgos morfológicos, este concepto es relevante en la biología evolutiva (Pavlicev et al., 2009).

Este concepto de integración morfológica en algunos estudios se mide como la varianza de los eigenvalores de un PCA, realizado sobre la estructura en la cual se

quiere estimar o cuantificar el grado de integración. Esta medida se basa en que cada eigenvalor es igual a la variación distribuida a lo largo del eigenvector correspondiente (Pavlicev et al., 2009). Autores proponen que para verificar si la integración morfológica es acompañada por un incremento en la varianza fenotípica debe calcularse una regresión entre ambos valores escalares. Si la estructura está fuertemente integrada y la varianza fenotípica es alta se espera que el valor de la regresión sea significativo y alto (Hallgrímsson et al., 2009).

### Variación entre grupos: Análisis de Variación Canónica

El análisis de variación canónica (CVA, por sus siglas en inglés, *Canonical Variance Analysis*) es un método que se utiliza para simplificar las descripciones de las diferencias entre grupos. Construye variables para describir las posiciones relativas de los grupos en la muestra. El CVA utiliza los patrones de variación dentro del grupo para escalar los ejes del nuevo sistema de coordenadas. Debido a este cambio de escala, los CV no son simplemente rotaciones del sistema de coordenadas original, y las distancias en el espacio de los CV no son iguales a las distancias en el sistema de coordenadas original. Como resultado del reescalado, el CV1 es la dirección en la que los grupos se discriminan más eficazmente, que no es necesariamente la dirección en la que las medias de los grupos son más diferentes (Zelditch, 2004).

La utilidad de los CV para discriminar entre grupos también puede evaluarse utilizando las distancias Mahalanobis entre grupos en función de los centroides de la muestra (James Rohlf & Marcus, 1993). En morfometría geométrica las distancias de Mahalanobis se pueden interpretar en términos de similitud o disimilitud entre grupos. Las variables canónicas son combinaciones de las variables que maximizan la separación entre los grupos. Cabe señalar que los ejes canónicos no son verdaderamente ortogonales, por lo que las distancias en las parcelas canónicas pueden estar ligeramente sesgadas; sin embargo, las gráficas de las variantes canónicas pueden proporcionar una representación visual de las distancias biológicas

entre los grupos (McKeown & Schmidt, 2013). Las variables canónicas pueden sugerir diferencias importantes que, de lo contrario, podrían pasarse por alto (Klingenberg, 2011).

### Comparación entre grupos: Análisis de Función Discriminante

El análisis de función discriminante (DFA, *Discriminant Function Analysis*) calcula la distancia desde un espécimen desconocido hasta los centroides para los grupos de referencia con el propósito de clasificación (James Rohlf & Marcus, 1993). El DFA clasificará al individuo según la distancia más pequeña. El análisis discriminante también genera una función lineal (clasificación) que consta de coeficientes y una constante. Para cada muestra individual, se puede calcular una puntuación discriminante multiplicando las variables originales por el coeficiente DFA y sumando la constante (McKeown & Schmidt, 2013). Los análisis canónicos y discriminantes se utilizan a menudo juntos para evaluar patrones de variación intergrupales e identificar la afinidad biológica de muestras individuales. La diferencia de los DFA con el CVA es, que en los DFA sólo dos grupos se consideran en el análisis (Klingenberg, 2011).

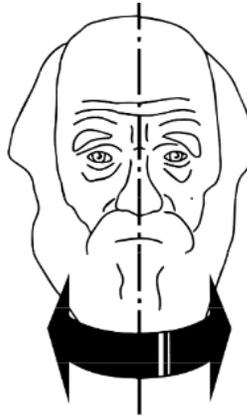
### Modelo de agrupación: Análisis de conglomerados

Los análisis de agrupación mejor conocidos como análisis clúster son utilizados para describir y caracterizar una población. El análisis clúster es un método utilizado para la formación de grupos con características similares a partir de las similitudes o disimilitudes que se presentan entre pares en  $n$  características evaluadas. Este tipo de análisis está compuesto por dos métodos interrelacionados: 1) Cálculo de los índices de similitud o disimilitud entre pares, 2) La aplicación del método de aglomeración, que permite a partir de los índices de disimilitud generar gráficas de árbol o dendogramas que son representaciones gráficas donde el investigador puede tener de una manera resumida el parecido o no que presentan los grupos (Núñez-Colín & Escobedo-López, 2011).

Los métodos de agrupamiento unen las unidades a caracterizar con el máximo parecido en la matriz de distancias, se agrupan los dos individuos más parecidos en un grupo (bloque 1). A partir de aquí, se van agrupando en un nuevo grupo los dos individuos más parecidos (bloque 2). Y así, el algoritmo termina cuando queda un único grupo. Entre más grande sea la distancia o más pequeño sea el índice de similitud, más diferentes son. El método UPGMA (*Unweighted Pair Group Method using Arithmetic Averages*) recalcula la matriz de distancias con el promedio de los valores de las distancias de los individuos del grupo con el de los otros individuos.

## Análisis de patrones de simetría-asimetría

Los análisis de simetría de objeto, en la morfometría geométrica, toman en cuenta el hecho de que cada configuración de referencia consta de dos mitades, que están dispuestas entre sí como imágenes especulares. Como consecuencia, hay dos tipos diferentes de *landmarks*: los que se localizan en el eje o plano medio, mientras que los restantes aparecen como pares a cada lado del eje medio. Por ejemplo, en la cara humana, donde la punta de la nariz, el nasion y gnation son *landmarks* únicos en la línea media, mientras que las esquinas de la boca, las esquinas interna y externa de los ojos, y demás *landmarks* similares aparecen como pares a cada lado de la cara, ver Figura 11. El análisis de simetría de objeto combina toda la configuración de *landmarks* con la copia que se ha reflejado a su imagen especular en un AGP.



**Figura 11.** Simetría de objeto La cara tiene un eje de simetría que corre en medio de ella. Tomado de (Klingenberg, 2015)

El AGP produce una forma media y una alineación óptima de todas las configuraciones, lo que minimiza la suma de las desviaciones cuadráticas de la configuración de consenso. Los resultados son útiles para el análisis de simetría. Después del AGP, las diferencias de la copia original (la copia reflejada y re-etiquetada) del consenso simétrico indican asimetría de forma (Klingenberg, 2015).

La asimetría fluctuante denota pequeñas diferencias entre los lados izquierdo y derecho debido a fluctuaciones aleatorias en los procesos de desarrollo

(Klingenberg, 2003). Un rasgo morfológico se espera que se exprese de una manera particular bajo el control de un genoma particular y bajo condiciones ambientales particulares pero un rasgo real para el lado del cuerpo en cuestión se desviará normalmente por una cantidad mayor o menor (Klingenberg, 2003). Para un individuo, las desviaciones de un rasgo del fenotipo objetivo que se producen en los dos lados del cuerpo por lo general difieren y por lo tanto dan lugar a un grado de asimetría. La asimetría direccional es cuando un lado siempre difiere de la misma manera (Slice, 2006). Puede ser cuantificada por la diferencia, ya sea grande o pequeña, entre los lados izquierdo y derecho; y dicha diferencia de izquierda-derecha en promedio diferirá de cero (Klingenberg, 2015).

## Análisis de patrones geoespaciales

La geoestadística es un tipo de estadística que se utiliza para predecir y analizar los valores asociados con fenómenos espaciales. Incorpora las coordenadas espaciales de los datos dentro de los análisis. La herramienta geoestadística es un medio práctico para describir patrones espaciales e interpolar valores para ubicaciones donde no se tomaron muestras. También a partir de esos valores interpolados se pueden proporcionar medidas de incertidumbre para esos valores. La medición de la incertidumbre es fundamental para la toma de decisiones informada, ya que proporciona información sobre los posibles valores para cada ubicación en lugar de solo un valor interpolado. La geoestadística se utiliza para producir predicciones para las ubicaciones sin muestrear (ESRI, 2020a).

El análisis espacial aplica operaciones geográficas, estadísticas y matemáticas a los datos representados en el mapa para descubrir relaciones o patrones. Y crear visualizaciones de propiedades espaciales como densidad, distribución, concentración geográfica, flujo y proximidad.

### Autocorrelación espacial, Índice de Moran

La autocorrelación espacial o Índice Global de Moran mide la autocorrelación espacial en función de las ubicaciones de las características y los valores de las características simultáneamente. Dado un conjunto de características y un atributo asociado, evalúa si el patrón expresado es agrupado, disperso o aleatorio. Calcula el valor del índice de Moran y una Puntuación Z como un valor p para evaluar la significancia de ese índice (Esri, 2020).

La autocorrelación espacial (I de Moran) es una estadística inferencial, lo que significa que los resultados del análisis siempre se interpretan dentro del contexto de su hipótesis nula. Para el estadístico I de Moran, la hipótesis nula establece que el atributo que se analiza se distribuye aleatoriamente entre las características de su área

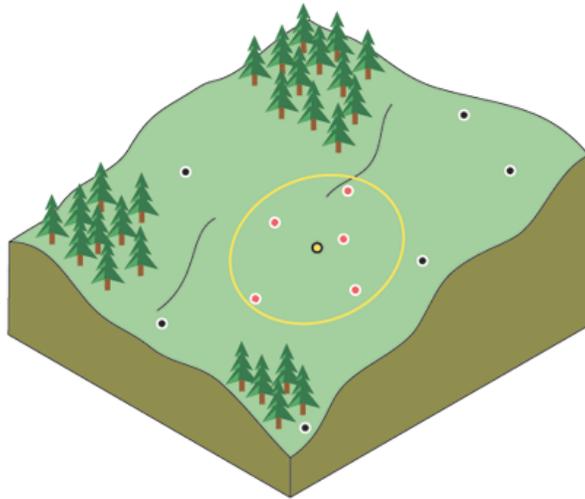
de estudio; dicho de otra manera, los procesos espaciales que promueven el patrón de valores observados son al azar. Cuando el valor p devuelto es estadísticamente significativo, puede rechazar la hipótesis nula.

La autocorrelación espacial genera una gráfica con los patrones de las Puntuaciones Z y los Valores p que indican si pueden rechazar la hipótesis nula o no. La hipótesis nula es la probabilidad de que el patrón espacial observado haya sido creado por algún proceso aleatorio. Cuando el Valor p es muy pequeño, significa que es muy poco probable que el patrón espacial observado sea el resultado de procesos aleatorios, por lo que puede rechazar la hipótesis nula.

## Interpolación geoespacial IDW

La interpolación predice valores para las celdas de un ráster a partir de una cantidad limitada de puntos de datos de la muestra. Puede utilizarse para predecir valores desconocidos de cualquier dato de un punto geográfico. La IDW (ponderación de distancia inversa) utiliza un método de interpolación que estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de la muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio(ESRI, 2020b).

La interpolación IDW funciona mediante una distancia inversa ponderada la cual determina los valores de una celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser, la de una variable dependiente de la ubicación, como se ejemplifica en la Figura 12. Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra.



**Figura 12.** Vecindad de IDW del punto seleccionado (amarillo) de un individuo de la muestra. Imagen tomada de (Esri, 2014).

## Fotogrametría en la reconstrucción de un modelo facial en 3D

La fotogrametría es la ciencia de obtener información fiable de objetos sin el contacto físico a través de la grabación, medida e interpretación de imágenes. Permite la reconstrucción geométrica de un objeto con forma, posición, orientación y tamaño de un objeto a través de fotografías (Linder, 2009). La fotogrametría permite la reconstrucción de estructuras complejas como la cara o el cráneo humano (Chiari et al., 2008). Su aplicación, el bajo costo y la facilidad de su uso confieren a la fotogrametría una ventaja sobre otras técnicas en la creación de modelos en 3D (Quinto-Sánchez et al., 2015). Para tales efectos, se emplea el programa computacional PhotoModeler, que extrae a partir de fotografías tomadas con una cámara mediciones y modelos 3D. Las consideraciones que requieren el programa PhotoModeler para mejores resultados son:

1) Alta resolución. 2) Objetivos sin Zoom de alta calidad. 3) Evitar el uso de los ajustes del Zoom digital. 4) Utilizar un objetivo de lente fijo. 5) No utilizar la función de reducción de vibraciones o lentes de estabilización de imagen. 6) Utilizar un filtro *anti-aliasing* y desactivar o reducir el ajuste de nitidez. 7) Dejar fuera las funciones automáticas, también para los controles de enfoque. 8) Calibrar la cámara con el software de Photomodeler, esto consiste en que se toman ocho fotos a una plantilla con puntos fiduciaros, que después se suben al programa para generar un modelo por medio de la función calibrador de cámara, que procesa las tomas de forma automática. El programa genera un archivo con esta información y se guarda como referencia de cámara en todos los proyectos fotográficos tomados con esa cámara.

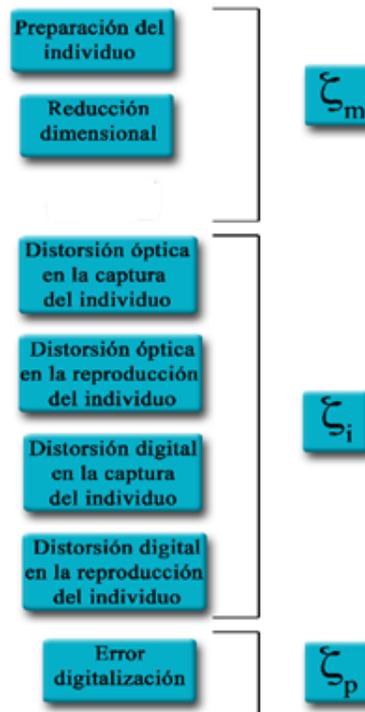
Hay que tomar en cuenta que son dos calibraciones, la calibración del programa PhotoModeler que elimina cualquier efecto de distorsión óptica. Y, la calibración de la cámara que es el procedimiento de encontrar los parámetros con los que se tomaron las fotografías como la distancia focal, el tamaño del formato, punto principal y la distorsión de la lente. El programa elimina la distorsión de la lente desplazando un

punto en la superficie de la imagen a su posición verdadera como si hubiera sido fotografiada por una cámara ideal *pinhole*. Todos estos indicadores son calculados por el programa de manera automática cuando se ejecuta el procedimiento de calibración por el usuario.

## Modelo general del error de medición

Para todos los experimentos realizados en estudios morfológicos, y sobre todo los geométricos, se sigue el modelo teórico de error de medición de la fórmula propuesta por Arnqvist y Materson (1998), y que sigue siendo el tratamiento más detallado respecto al tema (Fruciano, 2016):

$$EM(\zeta) = \zeta_m + \zeta_i + \zeta_p$$



**Figura 13.** Modelo general de medición. Fuente. - Arnqvist y Martensson (1998).

Donde  $\zeta_m$  es el error metodológico,  $\zeta_i$  el error del instrumento y  $\zeta_p$  el error personal, como se ilustra en la Figura 13. El error metodológico se refiere a la preparación del espécimen a medir, la reducción dimensional. El error del instrumento es la distorsión óptica que se pueda provocar al capturar al individuo, también se puede producir al reproducir el individuo, o una distorsión digital en la captura y reproducción del individuo. El error personal es el que se comete por el o los observadores en un banco de datos (Arnqvist & Mårtensson, 1998). Si hubiese errores,

hay distintos caminos para minimizar la atribución del error de medición en los resultados y resolver el problema; sin embargo, deben ser los menos posibles.

## Pruebas de error de medición entre observadores

Las pruebas de error de medición son obligatorias para cualquier estudio morfológico (Arnqvist & Mårtensson, 1998; Richtsmeier et al., 2002; Ross & Williams, 2008; Von Cramon-Taubadel et al., 2007). La propuesta consiste en realizar pruebas para verificar la fluctuación del error cometido por los observadores en las digitalizaciones de las fotografías, con el fin de que los experimentos de identificación facial tengan validez y admisibilidad de la evidencia científica.

Las coordenadas de los *landmarks* de referencia se sometieron a un Análisis Generalizado de Procrustes con el fin de colocar todas las observaciones en un marco de referencia, y se calculó la distancia euclidiana de cada punto de referencia a su respectivo centroide. Para cada observador, se calcularon las desviaciones medias y los errores porcentuales para cada punto de referencia individual y posteriormente se promedió para obtener una desviación media y un error porcentual para cada observador en todos los puntos de referencia (Singleton, 2002).

En el contexto de este análisis, la raíz de los cuadrados medios de los grupos (*root mean square error*) corresponde al error inter-observador (Campbell et al., 1970), mientras que la raíz de los cuadrados medios dentro de los grupos se correlaciona con el error intra-observador. El error intra-observador no supera los 0.33mm o el 2%, e incluso las observaciones más imprecisas no superan el 5% de error. Mientras que el error promedio entre observadores excede el error intra-observador en aproximadamente 0.66mm, los errores porcentuales medios son comparables dentro de los observadores y entre ellos.

## Identificación facial de personas vivas por medio de imágenes

Generalmente la antropología forense se centra en la identificación en estado *post-mortem*. Sin embargo, las solicitudes de identificación de personas vivas se han vuelto cada vez más comunes. Por ejemplo, se cuenta con sistemas de vigilancia digital que registran delitos. Como consecuencia las imágenes y los videos se convirtieron parte crucial en las investigaciones penales. Las imágenes de un sospechoso pueden compararse con las obtenidas de las cámaras de vigilancia considerando características individualizantes que podrían proporcionar pistas para la inclusión o exclusión de identidad. Por lo tanto, es necesario adaptar métodos existentes o proponer y adoptar nuevos (Gibelli et al., 2016). Aunque la tecnología de las videovigilancias pueda atrapar a los delincuentes en el acto, las imágenes captadas por la cámara tienen poco valor probatorio a menos que puedan relacionarse con un individuo concreto con un grado de confianza aceptable. Aunque se proporcionaran las pruebas de la acción ocurrida, hay que tener en cuenta que las características generales como la edad, el sexo y la ancestría sólo pueden sugerir o descartar una coincidencia, pero como se trata de imágenes, rara vez pueden ser absolutamente concluyentes por sí mismas (Evans, 2014).

El experto en comparación facial debe tener un buen conocimiento de las descripciones anatómicas y comunes de la anatomía superficial de la cara humana para poder informar de los resultados de su comparación. Los profesionales deben ser capaces de demostrar su capacidad para comparar la morfología y las proporciones faciales, observando las relaciones espaciales de los rasgos y los puntos de referencia faciales entre las imágenes (Evans, 2014). A diferencia de las declaraciones de los testigos, la comparación facial de imágenes no depende de la memoria. No sufre los problemas de la memoria y el almacenamiento de los recuerdos. En su lugar, se trata de un examen visual de imágenes inéditas, en movimiento o fijas, procedentes de diversos formatos (Evans, 2014). Muchas veces esas imágenes pueden estar propensas a las aberraciones y distorsiones del lente de la cámara con que fueron tomadas.

Un campo en rápido desarrollo para la verificación e identificación personal es la biometría, sin embargo, en los sistemas automatizados no está confirmada la precisión y objetividad. A diferencia de la biometría, existen otros métodos que se pueden utilizar para la identificación personal en casos forenses donde interviene el análisis de imágenes y videos. Estas son técnicas comparativas en donde participa un protocolo con un conjunto único de variables y la pericia del examinador en el proceso.

## Desafíos en la identificación facial en la antropología forense

La identificación personal a partir de imágenes requiere de investigaciones con métodos confiables y validados para evaluar características que permitan realizar comparaciones; ya sea entre personas vivas o personas representadas en imágenes o videos, con el objetivo de identificar a la persona dada. Sin embargo, existe incertidumbre sobre, a qué se le llama determinación científica de características distinguibles entre diferentes sujetos y la posibilidad de cuantificar tal juicio en un proceso de identificación. El supuesto de la ciencia de la identificación forense que es la individualización carece de evidencia teórica y empírica que respalde sus afirmaciones (Saks, 2010). Es necesario confiar en metodologías robustas en las cuales se pueda determinar con una certeza matemática la fiabilidad del dictamen pericial.

Actualmente, existen organizaciones como el *Facial Identification Scientific Working Group* (FISWG, 2020), *Arbeitsgruppe Identifikation nach Bildern* (AGIB, 2019) y el *International Association for Identification* (IAI, 2020) que han propuesto pautas y protocolos que pueden conducir a una evaluación estandarizada en casos de identificación personal. La misión de este grupo científico de trabajo es “desarrollar un consenso en cuanto a los estándares, guías y mejores prácticas para la disciplina de las comparaciones basadas en imágenes de las características de la cara humana; así como proporcionar recomendaciones para la investigación y actividades de desarrollo,

necesarias para avanzar en el estado de la ciencia de este campo”(FISWG, 2020). Según ellos, la identificación facial forense debe ser realizada bajo cinco procedimientos: 1) una evaluación inicial o diagnóstico, 2) examinación, 3) evaluación científica, 4) conclusión y 5) un manejo de la calidad / verificación o validación. Mediante estos puntos, el protocolo del FISWG permite la estandarización y la evaluación de un proceso pericial a realizar en cualquier laboratorio forense.

Y también propone la validación de los métodos existentes, agrupándolos en cuatro categorías: 1) comparación holística (reconocimiento visual), 2) análisis morfológico, 3) fotoantropometría y 4) superposición. La FISWG insiste en la necesidad imperante de entrenamiento para tener las competencias recomendadas para realizar una comparación facial. Un especialista en identificación facial forense tiene que ser capaz de: 1) realizar una evaluación de la calidad de la imagen para determinar el valor de ésta en la examinación, 2) proceso de análisis, comparación, evaluación y verificación, 3) métodos de comparación, 4) nivel de conclusión, 5) habilidad para dar apropiadas conclusiones, 6) visión general y efectos del sesgo cognitivo, 7) incluir una confirmación del posible sesgo de la identificación, 8) comprensión de los beneficios de la verificación por un segundo revisor o examinador (validación cruzada). Con respecto a la calidad de la imagen esta es una limitante en los protocolos, puesto que por esta razón algún análisis no se podrá realizar. Por lo tanto, el conocimiento de las ciencias de la imagen es un componente crítico con el que debe contar un especialista o equipo de identificación facial. En este rubro algunos de las categorías clave son: visión (color, iluminación), fotografía (principios generales, dispositivos), perspectiva (distancia al sujeto, ángulo de visión) e imágenes digitales, sistemas de compresión de imágenes, entre otras.

En los casos de identificación legal ya sea con fines de derecho civil o penal, es crucial que se utilicen métodos transparentes, objetivos y repetibles para discernir una persona de otra. La comparación de dos o más fotografías sigue siendo una tarea difícil, abierta a la interpretación subjetiva. No se han desarrollado procedimientos

obligatorios para el análisis de fotografías o imágenes de vídeo. Por lo tanto, es importante desarrollar una metodología sistemática de comparación facial, que dé lugar a resultados de identificación más concluyentes. Todavía no existen técnicas comunes que estén respaldadas universalmente, y cualquier avance en este ámbito sería un inmenso beneficio para la credibilidad del campo (Evans, 2014).

Capítulo 3:  
ANTECEDENTES

Para realizar una evaluación facial en el ámbito forense, se cuenta con tres enfoques: 1) El enfoque morfológico que es la comparación de formas faciales. 2) El enfoque métrico donde se comparan el tamaño facial derivado de mediciones directas o índices. Y, 3) el enfoque de superposición donde se combina la forma y tamaño.

### Enfoque morfológico, morfoscópico

Los primeros intentos de identificación de los humanos vivos con base en la morfología facial se remontan a las técnicas de la antropometría directa en Francia con Alphonse Bertillon en 1881. Él era un policía parisino, que motivado por el caos de los registros de antecedentes penales relacionados con problemas de identidad, quería mejorar las descripciones de presuntos delincuentes y confiaba en que un sistema de identificación detectaría rápidamente a los infractores reincidentes (Bertillon, 1890). Con las ideas prestadas de Broca sobre la medición de las diferencias físicas, desarrolló técnicas e instrumentos para medir características individuales como el color de los ojos y las distancias entre ellos, la forma y los ángulos de la oreja, la frente y la nariz. Y se apoyó en el uso de los datos cuantitativos que comenzó a finales del Siglo XIX con Francis Galton, precursor de la estadística moderna (Stephen Jay Gould, 2005).

Los métodos morfológicos se basan en la clasificación de diferentes rasgos faciales según esquemas estandarizados y comparaciones de estos rasgos plasmados en atlas fotográficos entre la persona representada y el sospechoso o víctima (Ohlrogge, 2008, 2009; Vanezis et al., 1996). Dichos rasgos incluyen dos niveles: global (que corresponde a la cara general), local (incluidas estructuras anatómicas como la nariz o la boca y sus componentes, por ejemplo, puente nasal, orificios nasales, lóbulos de las orejas) y marcas faciales características distintivas como cicatrices o lunares (rasgos de variación normal individualizantes). Una diferencia claramente identificada de la morfología facial entre dos individuos puede servir como exclusión de identidad. Sin embargo, se ha demostrado que las descripciones

de las características individuales son en gran medida subjetivas. Pues se presentaron desajustes de error intra e interobservador de 19% a 39% en la evaluación de los rasgos faciales, lo que sugiere precaución en verificar la identidad personal solo a partir de la clasificación de rasgos faciales. Sin embargo, el uso de estos atlas conduce a una mejora significativa en la coherencia de la evaluación (Ritz-Timme et al., 2011). En esta área, en México se realizaron trabajos de sumo interés como el proyecto *La cara del mexicano* (Caramex) que es una gran base de datos de fotografías faciales que son todo un sistema computarizado de identificación personal basado en la información fenotípica expresada en los rasgos faciales de los mexicanos (Serrano et al., 1999).

Según Gibelli, et al. (2016) el enfoque morfológico presenta varios problemas como el no establecer un número específico de características que deben evaluarse y compararse para llegar a una identificación positiva; y no fijar una tasa de error en las comparaciones. Los artículos que tratan de la evaluación morfológica facial a menudo no informan las tasas de error, y no toman en consideración la necesidad de cuantificar la fiabilidad en un juicio penal (Porter & Doran, 2000). Entonces, no se puede cuantificar con precisión incluso cuando se cuente con una cantidad grande de rasgos faciales coincidentes. Sin embargo, no todo está perdido, la presencia de una clara discordancia de rasgos faciales puede proporcionar una exclusión en la identificación. Además, la evaluación morfológica de los rostros también puede tener un potencial de identificación positiva en los casos en que las comparaciones morfológicas involucran rasgos faciales característicos de condiciones congénitas, patológicas y traumáticas, que pueden considerarse únicos.

### Enfoque métrico

Este es generalmente conocido como fotoantropometría, incluye una evaluación cuantitativa del rostro midiendo las distancias entre puntos de referencia de tejido blando, definidos por antropólogos. Estos puntos se pueden identificar en el rostro de

una persona viva o en imágenes fotográficas. Si bien, es un enfoque cuantitativo, la fotoantropometría fue criticada debido a la falta de emparejamiento en la comparación entre las mediciones tomadas en vivo y las fotografías, sin embargo hay que tomar en cuenta que en este estudio que se titula: *El fracaso de la antropometría como técnica de identificación facial mediante fotografías de alta calidad* (Kleinberg et al., 2007) sólo tomo en cuenta cuatro puntos antropométricos de referencia lo que habla que desde un principio la metodología no fue la idónea. En otra investigación se presentaron algunos casos donde puntos craneofaciales combinados con la altura corporal, peso y características de la oreja fueron utilizadas para una identificación positiva (Halberstein, 2001). La antropometría indirecta tuvo su auge en los años sesenta en Estados Unidos con la introducción de las fotografías, de donde se podían hacer mediciones en las fotos para después archivarlas y medir los errores interobservador en programas de computación sin tener contacto directo con el sujeto (Smeets et al., 2010).

Otros estudios probaron modelos de rostros en formato tridimensional mediante el uso del software PhotoModeler en una muestra limitada de 15 individuos, en nueve casos se alcanzó la identificación, pero en cinco casos la coincidencia era probable entre varios individuos, y en un caso la coincidencia fue incorrecta (Lynnerup et al., 2003).

Hay propuestas para la estandarización en las medidas de las proporciones faciales e índices derivados de técnicas automatizadas asistidas por computadora mediante la extracción automática de puntos de referencia faciales (Tome et al., 2013). Un estudio de comparaciones cuantitativas de fotografías e imágenes de video basadas en puntos craneofaciales antropométricos los derivaron en vectores y crearon una ecuación para identificar que fotos de la muestra de 119 fotografías correspondían con 80 imágenes de video. Sus resultados permitieron mayores coincidencias para dictaminar un positivo verdadero; sin embargo, en su método sugieren precaución al emitir un juicio sobre la identificación pues se probó en una muestra pequeña, y

aunque los resultados que existen son prometedores deben verificarse en bases de datos de imágenes más grandes (Kleinberg & Siebert, 2012).

En otro estudio aplicado a población mexicana contemporánea, se aplicaron métodos morfogeométricos y estadística multivariada para describir la variación fenotípica dentro del conjunto de datos, así como la variación con respecto al sexo y los grupos de edad. Se evaluó la frecuencia de los rasgos faciales para comprender la distribución normal y reconocer aquellos rasgos con alto poder de discriminación, lo que permite mejorar la precisión y la fiabilidad de la evidencia (Farrera, García, & Villanueva, 2016)

Uno de los factores que se observan en todos los experimentos es que la calidad, resolución y distorsión de la imagen, así como la posición de la cabeza y la cara, pueden constituir una limitación importante para el enfoque métrico (Gibelli et al., 2016). También influye la calibración de la cámara en el momento de la toma, el ángulo de la toma, así como la distancia de la cámara con el sujeto pues esto último afecta en las proporciones faciales y en la resolución de píxeles de la imagen. A diferencia del DNA y las huellas dactilares, las proporciones de la cara no se fijan a lo largo de la vida por lo que no representan características individualizantes concluyentes (Gibelli et al., 2016). Sin embargo, en un futuro esto puede cambiar y beneficiarse con el creciente número de datos de referencia poblacional y ayudar potencialmente a verificar la individualidad para la identificación personal.

## Métodos de superposición

Estos métodos se dividen en dos categorías: 1) Comparaciones de 2D-2D, incluida la superposición de imágenes 2D del sujeto representado y un sospechoso. 2) Comparaciones de 2D-3D, abarcan comparaciones entre una imagen 2D de una persona tomada de una cámara de un sistema de videovigilancia y un modelo virtual en 3D del sospechoso registrado por un digitalizador óptico en 3D. Aunque aquí hay que aclarar que el uso de los términos 2D se refiere a las imágenes fotográficas y la

palabra 3D se refiere a la creación de modelos 3D de la persona real que se identificará, que pueden usarse para comparación o superposición en las imágenes 2D preexistentes y que se pueden rotar y adaptar en consecuencia.

No hay mucha literatura que proporcione confiabilidad en el posicionamiento de los puntos de referencia faciales en material fotográfico 2D, y mucho menos estudios disponibles que analicen sobre los errores interobservador e intraobservador en tal operación. En un experimento con 22 puntos de referencia en 11 imágenes se les pidió a 24 operadores repetir el procedimiento en las mismas fotografías 20 veces. Sus resultados arrojaron que pocos puntos anatómicos se pueden definir con la mayor precisión y muestran la importancia de la investigación preliminar de la confiabilidad en el posicionamiento de los puntos de referencia faciales (Cummaudo et al., 2013). Otro inconveniente con el error es que cuando se compara la fotografía con el sospechoso, la posición de ambas imágenes debe ser igual, pero no siempre se logra esa concordancia absoluta.

Como resultado de todos los inconvenientes de las comparaciones 2D-2D, se considera que el método de comparación 2D-3D es más confiable para la identificación personal, ya que implica la adquisición de un modelo facial en 3D de la cabeza del sospechoso mediante un escáner láser 3D (Kovacs et al., 2006; Lynnerup et al., 2003) con una superposición posterior de las imágenes 2D de la persona representada mediante el cambio de tamaño, reposicionamiento, reorientación utilizando un software especial hasta que se logre la mejor coincidencia para las caras (De Angelis et al., 2009; Yoshino et al., 2002, 2005). Aunque las comparaciones 2D-3D pueden llegar a ser más fiables, todavía falta la evaluación cuantitativa de la coincidencia entre los dos perfiles y que incluya un valor de probabilidad de una identificación correcta (Gibelli et al., 2016).

Capítulo 4:

## SUJETOS, MATERIALES Y METODOLOGÍA

## La muestra

Para lograr los objetivos de la presente investigación se retomaron los datos del *Consortio para el Análisis de la Diversidad y Evolución en Latinoamérica*, conocido como Proyecto CANDELA (en alusión a sus siglas iniciales). Se centró en población urbana de cinco países: Brasil, Chile, Colombia, Perú y México. En los individuos de esas poblaciones se analizó fenotipo, acervo genético y entorno social. El proyecto contiene una muestra de 7,342 individuos. En todos se llevó a cabo la aplicación de protocolos para: 1) toma de muestra sanguínea, 2) toma de mediciones antropométricas, 3) toma de fotografías faciales, 4) lectura de pigmentación y 5) encuesta socioeconómica. Dicho protocolo contó con la aprobación de los comités de ética de las distintas instituciones encargadas y con el consentimiento informado de los participantes voluntarios.

De la base de datos total, se seleccionó la población mexicana y su base fotográfica de 1,387 individuos de ambos sexos, con lugar de nacimiento conocido, medidas antropométricas y datos genómicos. Los rangos de edad de los individuos oscilan de entre los 18 a los 87 años; sin embargo, el mayor número de individuos se distribuye entre las edades de 18 a 26 años. Las mujeres son mayoría (n=844) en relación con los hombres (n= 543) ver Tabla 1. Con respecto al lugar de nacimiento, la Ciudad de México tiene un porcentaje de 69% de individuos, el Estado de México 9% y los demás estados de la República suman el resto, ver Tabla 2.

**Tabla 1.** Detalles de la muestra concerniente a la edad y sexo.

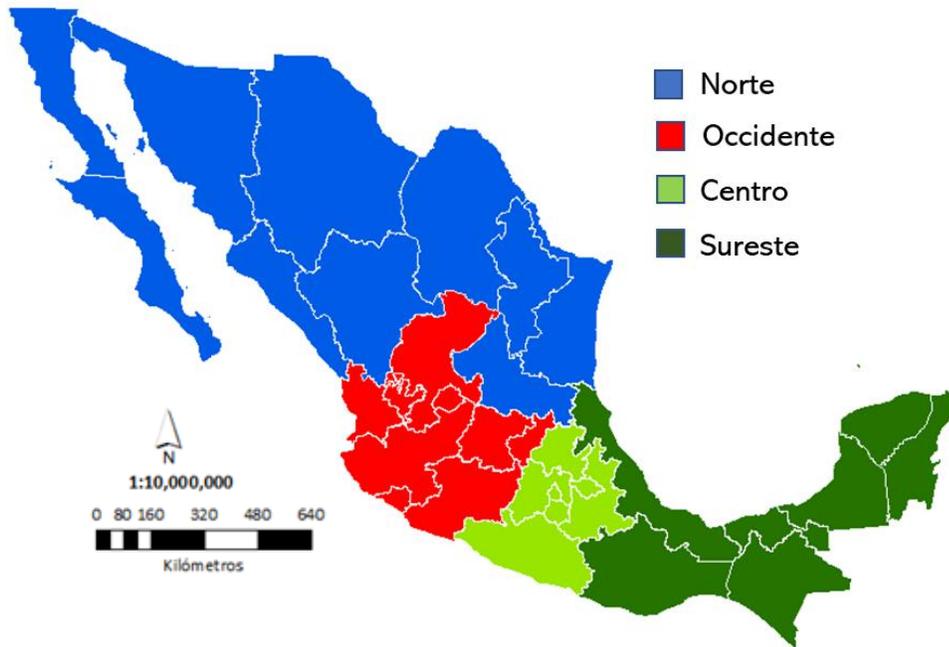
Rangos de edad					
Sexo	Joven (18-21)	Adulto joven (22-39)	Adulto medio (40-60)	Adulto mayor (61-87)	Total
<b>Hombre</b>	163	311	64	5	543
<b>Mujer</b>	279	428	122	15	844
<b>Total</b>	442	739	186	20	1387

**Tabla 2.** Frecuencia de voluntarios divididos por lugar de nacimiento y ordenados en descendente.

Lugar de Nacimiento	Voluntarios	% del total	Lugar de Nacimiento	Voluntarios	% del total
Ciudad de México	957	68.99784	Sinaloa	5	0.36049
Estado de México	134	9.661139	Sonora	5	0.36049
Guerrero	47	3.388609	Tamaulipas	5	0.36049
Puebla	32	2.307138	Tlaxcala	5	0.36049
Oaxaca	29	2.090844	Baja California	4	0.288392
Veracruz	29	2.090844	Coahuila	4	0.288392
Hidalgo	19	1.369863	Durango	4	0.288392
Morelos	19	1.369863	Nuevo León	4	0.288392
Guanajuato	15	1.081471	Aguascalientes	3	0.216294
Querétaro	11	0.793079	Campeche	3	0.216294
Chiapas	10	0.720981	Zacatecas	3	0.216294
Michoacán	10	0.720981	Nayarit	2	0.144196
Tabasco	10	0.720981	San Luis Potosí	2	0.144196
Jalisco	9	0.648882	Baja California Sur	1	0.072098
Chihuahua	5	0.36049	Yucatán	1	0.072098
			Total	1387	100

Para realizar la distribución biogeográfica, se tomó el enfoque de la Escuela de Análisis Espacial que considera a la región territorial como un proceso de clasificación en el cual se señalan la presencia o ausencia de características distintivas (ya sean físicas o humanas) (Agnew et al., 1996; López Levi & Ramírez, 2012). Siguiendo dichos preceptos de la geografía, para hacer los análisis a nivel regional, el territorio se dividió en cuatro regiones, ver Figura 14:

1. Norte: Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora y Tamaulipas.
2. Occidente: Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Querétaro y Zacatecas.
3. Centro: Ciudad de México, Estado de México, Guerrero, Hidalgo, Morelos, Puebla y Tlaxcala.
4. Sureste: Campeche, Chiapas, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán.



**Figura 14.** Mapa de la República Mexicana dividido por regiones Norte, Occidente, Centro y Sureste para el presente estudio.

# Fenotipado

## Protocolo de fotografía científica facial

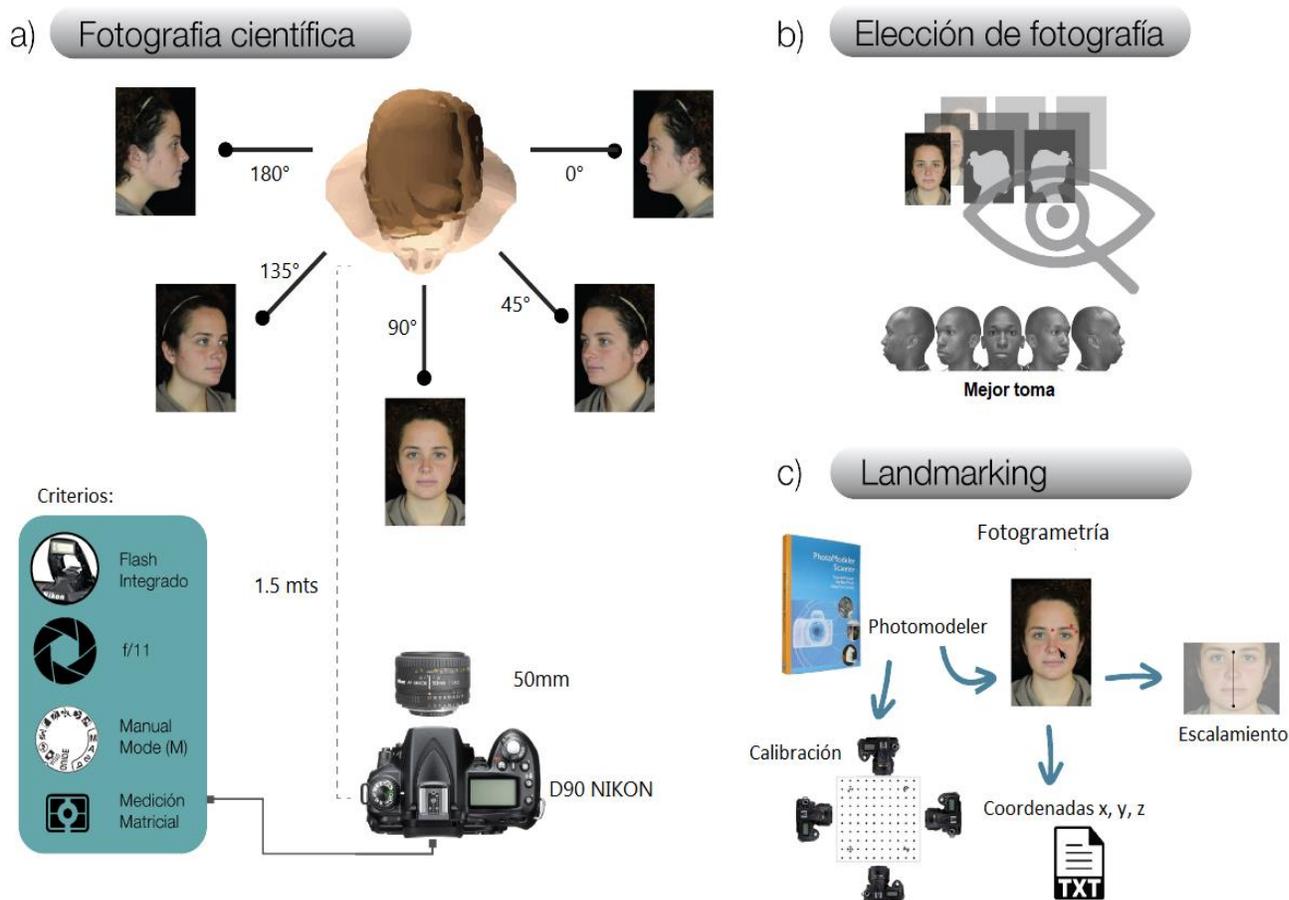
Las imágenes faciales de los individuos se capturaron siguiendo el protocolo estandarizado de fotografía científica con seis pasos a tomar en cuenta: 1) la cámara fotográfica, 2) los objetivos, 3) el valor f y profundidad de campo, 4) las escalas o testigos métricos, 5) el color y 6) la estimación de error.

La toma fotográfica se realizó manualmente con una cámara réflex digital modelo NikonD90 y un lente óptico fijo Nikon de 50mm (previamente calibrada como lo recomienda el programa de fotogrametría PhotoModeler), con una apertura del diafragma de f/11 y el *flash* integrado, la cámara se posicionó a una distancia de 1.5 metros al rostro. Se capturaron una serie de cinco tomas diferentes a la cara: dos laterales izquierda y derecha a 0° y 180°, dos frontolaterales a 45° y 135° y una frontal a 90°, como se observa en la Figura 15a.

Se realizaron tres series fotográficas de cada rostro para su posterior discriminación visual, bajo el criterio de descartar las dos sesiones de mala calidad y retener para la reconstrucción fotogramétrica la mejor serie en cuanto a foco, expresión neutra e iluminación. Se verificó en las cinco fotos se observarán todas las estructuras anatómicas donde se pondrían los puntos. Se comprobó que las fotografías no estuvieran fuera de foco. Era primordial una cara capturada en expresión facial neutra, ejemplo en Figura 15b, cualquier foto con sonrisa, entrecierre de ojos, de boca o gestos era desechada. De igual manera, se procuraba eliminar los objetos que interfirieran en la visión y digitalización de los *landmarks* del protocolo como aretes y cabello. El voluntario para la captura se posicionaba en la orientación al plano de Frankfurt como referencia (plano porion-orbital), expresión facial neutra y la menor cantidad de maquillaje. Aunque con la reconstrucción en 3D por fotogrametría los efectos de rotación derecha-izquierda o flexión-extensión de la cabeza no conforman

elementos de ruido en la toma, como lo pudieran ser en las fotografías de trabajos en 2D.

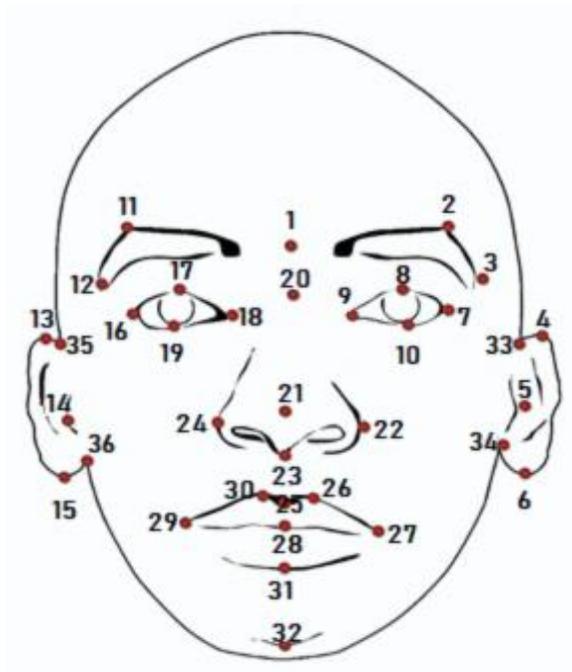
Es importante mencionar la calibración de la cámara, esto consiste en la toma de ocho fotografías a una plantilla con puntos fiduciaros en dos vistas: toma horizontal y toma vertical. El programa PhotoModeler analiza la aberración del lente para su corrección. Con las cinco fotografías elegidas y la calibración, uno puede digitalizar el protocolo de 34 *landmarks* faciales en el programa PhotoModeler. Este procedimiento es con el que se generan los modelos tridimensionales, ver descripción gráfica en la Figura 15c.



**Figura 15.** Protocolo de fotografía y fotogrametría en la reconstrucción de los modelos tridimensionales para identificación facial forense. En el inciso **a)** ángulo de las cinco tomas fotográficas; **b)** elección de la mejor toma de tres series; **c)** proceso de digitalización (*landmarking*) de las cinco fotografías para la creación del modelo 3D con el software Photomodeler. Imagen tomada de (Quinto et al., 2015).

## Protocolo de digitalización de 34 landmarks faciales

Para el presente trabajo, se utilizaron 34 puntos craneométricos (Quinto-Sánchez et al., 2015, 2018; Ruiz-Linares et al., 2014) de los que se integran 8 sagitales y 26 bilaterales; la Tabla 3, informa las definiciones anatómicas de cada uno de los *landmarks* (Ercan et al., 2008; V F Ferrario et al., 1995). Este protocolo de *landmarks* representa la varianza fenotípica de la cara como se observa en la Figura 16 y lo cual es idóneo para una identificación forense que requiere de una repetibilidad del protocolo.



**Figura 16.** Protocolo de 34 *landmarks*. Se muestra la secuencia de la digitalización de los *landmarks*. Imagen tomada de (Ruiz-Linares et al., 2014).

**Tabla 3.** Definiciones anatómicas de los *landmarks* faciales para este análisis.

No.	Nombre	Definición anatómica
<b>Landmarks sagitales</b>		
<b>1</b>	Glabela	El punto sobre la línea media a la altura de los arcos superciliares
<b>20</b>	Nasion	El punto medio de la sutura nasofrontal
<b>21</b>	Infrapronasal	El punto más prominente de la nariz
<b>23</b>	Subnasal	El punto medio donde se une el borde inferior del septum nasal, la partición que divide las narinas y la porción cutánea del labio superior
<b>25</b>	Labial superior	El punto medio del borde vermillion sobre el labio superior
<b>28</b>	Stomion	El punto medio de la fisura labial cuando los labios están cerrados naturalmente
<b>31</b>	Labial inferior	El punto medio del borde vermillion del labio inferior
<b>32</b>	Gnathion, pogonion	El punto más bajo en la línea media del borde inferior de la barbilla
<b>Landmarks bilaterales</b>		
<b>2, 11</b>	Superciliar	El punto sobre el arco superciliar, en la parte más alta de la ceja.
<b>3,12</b>	Frontotemporal	El punto más medial sobre la cresta temporal del hueso frontal
<b>4,13</b>	Superaurale	El punto máximo en el borde superior de la oreja
<b>5,14</b>	Tragion	La punta del tragus
<b>6,15</b>	Subaurale	El punto más bajo en el borde inferior de la oreja
<b>7, 16</b>	Exocanthion.	La esquina exterior de la hendidura del ojo donde los párpados se encuentran.
<b>8, 17</b>	Palpebrale superiorus	El punto más alto en el margen superior de la porción media del párpado
<b>9, 18</b>	Endocanthion	La esquina interior de la hendidura del ojo donde los párpados se encuentran no es caruncular
<b>10, 19</b>	Palpebral inferiorus	El punto más bajo en el medio del margen del párpado inferior
<b>22,24</b>	Alar	El punto más lateral sobre el ala nasal
<b>26, 30</b>	Crista philtre (upper lip point)	El punto sobre la cresta de la depresión infranasal (philtrum), cuando esta cruza con el borde vermillion
<b>27, 29</b>	Cheilion	La esquina externa de la boca donde los bordes externos del vermillion superior e inferior se encuentran
<b>33, 35</b>	Otobasion superiorious	El punto superior de inserción con la oreja
<b>34, 36</b>	Otobasion inferiorous	El punto inferior de la unión entre el lóbulo y la cabeza (punto de inserción de la oreja)

## Estimación genómica de la ancestría y heterocigosidad

La base de datos contiene datos genómicos de 730, 525 SNPs contenidos en el chip Illumina's Omni Express Bead Chip. Estos SNPs se sometieron a un análisis de desequilibrio de ligamiento, con el cual 90,000 SNPs <sup>4</sup> fueron válidos para el análisis que arroja la información de ancestría.

La heterocigosidad media de todo el genoma (*Genome-wide average heterozygosity*) se estimó con estos datos utilizando PLINK (Purcell et al., 2007; Yang et al., 2011). La heterocigosidad se calcula como  $1 - \text{homocigosis}$ , mientras que la homocigosis se estima utilizando el coeficiente de endogamia como el promedio de alelos homocigotos a través de todos los SNPs para un individuo en comparación con el grupo global.

Los datos genómicos que aquí se emplearon se validaron por numerosos estudios de asociación de genoma completo para la búsqueda de genes candidatos de variación facial humana (Quinto-Sánchez et al., 2015, 2018; Ruiz-Linares et al., 2014).

---

<sup>4</sup> Los polimorfismos de nucleótido único (SNP) son un tipo de polimorfismo que producen una variación en un solo par de bases. Se refiere a los lugares en el genoma donde las personas son diferentes en un lugar específico. Aproximadamente en una de cada 1000 letras del código se encuentra uno de estos lugares. En éste, una persona puede tener una C y otra puede tener una T. Esto es lo que se llama un SNP. La mayoría de los SNPs no tienen mucho significado, porque están en una parte del genoma que no tiene una función crítica. Sin embargo, algunos de ellos confieren información sobre tipos de fenotipos y en la diferenciación de individuos (Collins, 2020).

## Diseño experimental

### Pruebas de error de medición entre observadores

Para examinar los efectos del error intra e interobservador en el presente trabajo, se generaron comparaciones entre digitalizaciones realizadas por tres observadores (Observador 1LC= Lucía Castillo, Observador 2MQ= Mirsha Quinto y Observador 3PC= Paulina Cruz) utilizando el protocolo de 34 *landmarks* de CANDELA. Los primeros observadores LC y MQ validaron sus diferencias intra e inter previamente (Quinto-Sánchez et al., 2015, 2018; Ruiz-Linares et al., 2014). Siguiendo el mismo protocolo la tercera observadora PC realizó un diseño de medidas repetidas con las fotografías de un individuo por un periodo de 15 días, intercalando un día libre entre cada digitalización. Las observaciones realizadas por los observadores se reunieron en una sola matriz para su posterior análisis. Las imágenes se escalan en milímetros con la distancia del diámetro chelion-chelion. La hipótesis esperaba no encontrar diferencias estadísticas entre los observadores. El análisis llevó a cabo el cálculo de estadísticos univariados de contraste de varianza ANOVA (Singleton, 2002).

### Regresión multivariante de la forma

Los análisis de regresión se hicieron con los datos de las morfocoordenadas que arrojó el programa MorphoJ, para probar las diferencias entre el grado de correlación de la forma de la cara según sexo, edad, índice de masa corporal (IMC), ancestría genética europea, ancestría genética amerindia y heterocigosidad. En todas las pruebas se incluye el estudio de la variación de la forma simétrica y asimétrica.

### Morfoespacio: Análisis de Componentes Principales

Este estadístico se realiza con el software especializado para morfometría geométrica MorphoJ. El cual arroja las características principales de la variación de la forma en

el conjunto de datos; todo ello se genera y analiza dentro de un morfoespacio donde se pueden observar las relaciones entre los individuos (Klingenberg, 2011).

## La integración morfológica como proxy de la variabilidad modular

Bajo estas premisas se cuantificó utilizando los conceptos de la integración morfológica, la distribución de los eigenvalores de los PCA como indicadores y la varianza de los eigenvalores escalados por la varianza total y el número de variables, con el objetivo de ponderar los efectos de la variación en este caso por región geográfica. Adicional, se agregó una regresión lineal simple de la asociación entre la varianza de los eigenvalores escalada por la varianza total y el número de variables respecto de la varianza fenotípica para cada componente simétrico y asimétrico, para comprobar si el cambio de la región geográfica representa una modificación del cambio morfológico. De esta manera, se podrá saber si las regiones están correlacionadas y comparten la variación de la forma facial.

## Variación entre grupos: Análisis de Variación Canónica

Las variables canónicas pueden sugerir diferencias importantes que, de lo contrario, podrían pasarse por alto. El programa MorphoJ computa las características de la forma de la cara que mejor se distinguen entre los grupos de individuos (Klingenberg, 2011).

## Autocorrelación espacial: Índice de Moran

Para calcular el índice de Moran, primero se obtuvieron las coordenadas geográficas del lugar de nacimiento de todos los individuos de la muestra para posicionarlos en el territorio mexicano mediante *Google Maps Geocoding API*. Después, se utilizaron los números de los scores PC1, PC2, PC3 (de ambas simetrías), los scores de CV1, CV2, CV3 (de ambas simetrías), las covariables de ancestría genética amerindia y la europea de los individuos de la muestra. Por último, la herramienta de autocorrelación espacial computó los resultados de los datos introducidos.

## Interpolación geoespacial IDW

Para interpolar, primero se obtuvieron las coordenadas geográficas del lugar de nacimiento de todos los individuos de la muestra de estudio para posicionarlos en el territorio mexicano. Después, se utilizaron los números de los *scores* PC1, PC2, PC3 (ambas simetrías), los *scores* de CV1, CV2, CV3 (ambas simetrías), las covariables de ancestría genética amerindia y ancestría genética europea de los individuos de la muestra. Por último, la herramienta de interpolación IDW predice en un ráster a lo largo del mapa de México los resultados de los datos introducidos.

## Comparación entre grupos: DFA

En estos análisis se comparan los distintos grupos regionales en pares: el grupo del Centro- Norte, Centro-Occidente y Centro-Sureste. Después, el grupo del Norte-Occidente y Norte-Sureste. Finalmente, Occidente-Sureste. Para todas las comparaciones se tomaron ambas formas de variación simétrica y asimétrica, con 10,000 permutaciones para cada una.

## Modelos de agrupación: Análisis de conglomerados

Se empleó el algoritmo UPGMA para obtener un *cluster*. Se realizó con el programa estadístico Past3 (Hammer & Harper, 2013). Desde los resultados de la matriz de distancias Mahalanobis de los CVA y sobre esta matriz generar un dendrograma con 10,000 permutaciones para ambas simetrías.

Abajo, en la Figura 17 se esquematiza el proceso de todos los análisis que conforman el diseño experimental de la presente investigación:



**Figura 17.** Diagrama del diseño experimental de la tesis.

Capítulo 5:  
RESULTADOS

## El error intra e interobservador

Se analizó la variación entre los observadores con un ANOVA y un PCA, los resultados mostraron diferencias significativas ( $p > 0.0001$ ) entre los puntos anatómicos de las cejas, las orejas, el nasion y el gnation; debido a estas diferencias, todos los rasgos se estandarizaron siguiendo la fórmula de (Ackermann et al., 2006), donde las coordenadas se ajustan a la media del observador validado y aprobado por publicaciones científicas (Quinto-Sánchez et al., 2015, 2018; Ruiz-Linares et al., 2014) y así eliminar efectos confusos en la variación de la forma.

Realizada la estandarización, se calcularon las distancias de los 36 landmarks y sobre éstas se hizo un ANOVA de una vía para obtener los resultados de *Root Mean Square Error* (RMSE), en la Tabla 4 se observa que el porcentaje del error medio interobservador es mayor (1.5897) que el intra-observador (0.4103). Según Singleton (2002) los valores intra e inter no deben exceder el 2%, y en los resultados ningún porcentaje lo excedió.

**Tabla 4.** Valor medio del error inter e intra-observador a través de los *landmarks*.

	RMSE			% RMSE		
	Min	Max	Media	Min	Max	Media
Interobservador	0.0001727	0.0383536	0.0084424	0.5160	1.8640	1.5897
Intraobservador	0.0004967	0.0043589	0.0015516	0.1360	1.4840	0.4103

## Regresión multivariante de la forma

Se realizó un análisis de regresión multivariante de la varianza total de la forma simétrica y asimétrica como variables dependientes con las covariables de *centroid size*, sexo, edad, índice de masa corporal (IMC), ancestría europea, ancestría amerindia y heterocigosidad como variables independientes. Con diez mil permutaciones para un valor de significancia, los resultados se despliegan en la Tabla 5. En cuanto a los resultados del *centroid size* resultan ser significativos para ambos

componentes simétrico (0.71%,  $p < 0.0001$ ) y asimétrico (0.27%,  $p < 0.0001$ ) lo que indica que la influencia de la alometría es muy baja.

**Tabla 5.** Regresión multivariante del componente simétrico y asimétrico de la forma.

Simétrica	% predicho	P-value	Asimétrica	% predicho	P-value
<b>Centroid Size</b>	0.71	<0.00001	<b>Centroid Size</b>	<b>0.27</b>	<b>&lt;0.0001</b>
<b>Sexo</b>	<b>9.52</b>	<b>&lt;0.0001</b>	<b>Sexo</b>	<b>0.90</b>	<b>&lt;0.0001</b>
<b>Edad</b>	3.16	<0.0001	<b>Edad</b>	<b>0.83</b>	<b>&lt;0.0001</b>
<b>IMC</b>	<b>7.61</b>	<b>&lt;0.0001</b>	<b>IMC</b>	<b>0.14</b>	<b>0.0186</b>
<b>Ancestría europea</b>	1.51	<0.0001	Ancestría europea	0.11	0.1165
<b>Ancestría amerindia</b>	1.38	<0.0001	Ancestría amerindia	0.12	0.2262
<b>Heterocigosidad</b>	1.14	<0.0001	Heterocigosidad	0.21	0.0604

### *Componente simétrico de la forma*

El mayor porcentaje de varianza predicha de la forma simétrica fue para el sexo (9.52%,  $p < 0.0001$ ) en la gráfica de regresión de la Figura 18a, se describe dicha variación entre mujeres y hombres. Le continua el índice de masa corporal que presenta valores de (7.61%,  $p < 0.0001$ ), en la gráfica de la Figura 20a, el modelo de la regresión lineal presentó un ajuste bueno entre hombres y mujeres en el IMC. Después, la edad presenta un porcentaje de (3.16%,  $p < 0.0001$ ) en la gráfica de la Figura 19a, el modelo lineal se ajusta bien en los cuatro grupos de edad.

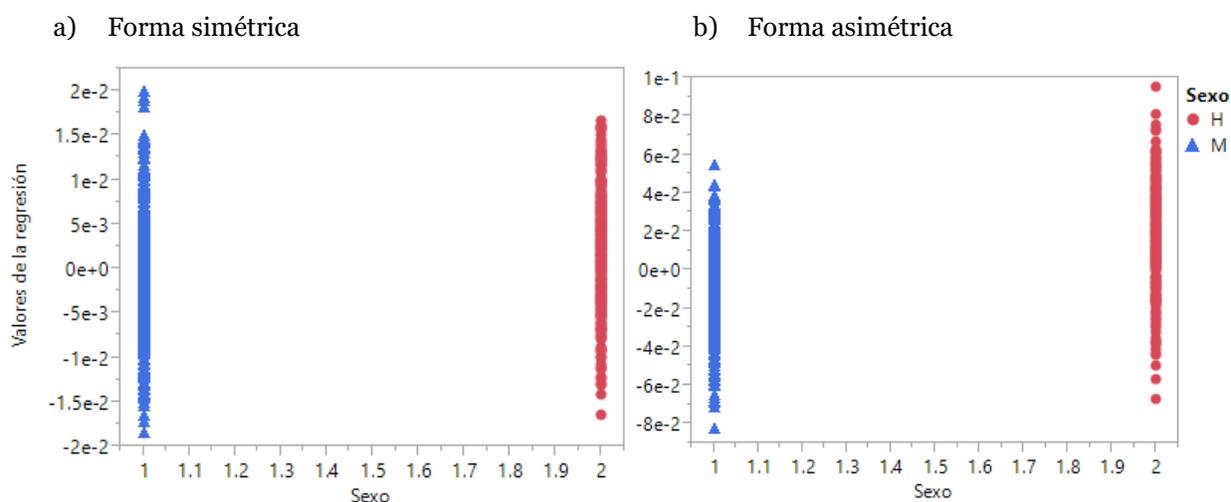
Con respecto a los porcentajes predichos de la variación genética, la ancestría amerindia fue de (1.38%,  $p < 0.0001$ ) en la gráfica de la Figura 22a, tiene un ajuste lineal positivo. La ancestría europea fue de (1.51%,  $p < 0.0001$ ) y la línea de regresión se ajusta al modelo, ver Figura 21a. Por último, la heterocigosidad presentó el porcentaje predicho de variación de (1.14%,  $p < 0.0001$ ) en la gráfica de la Figura 23a el modelo de la regresión lineal es positiva para ambos sexos.

### *Componente asimétrico de la forma*

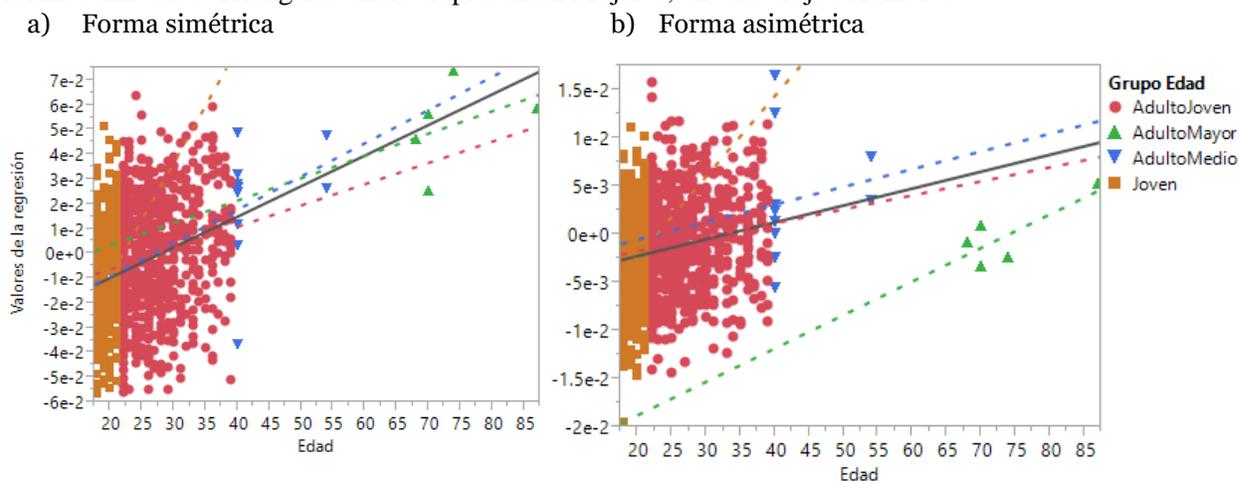
Por otro lado, la forma asimétrica, en general, presenta un porcentaje predicho bajo y algunas variables no llegan a ser significativas. Por ejemplo, la ancestría genética

européa (0.11%,  $p=0.1165$ ) y la ancestría genética amerindia (0.21%,  $p=0.2262$ ) y en sus gráficas respectivas de la Figura 21b y Figura 22b la regresión lineal es negativa; tampoco para la heterocigosidad (0.21%,  $p=0.0604$ ) Figura 25b.

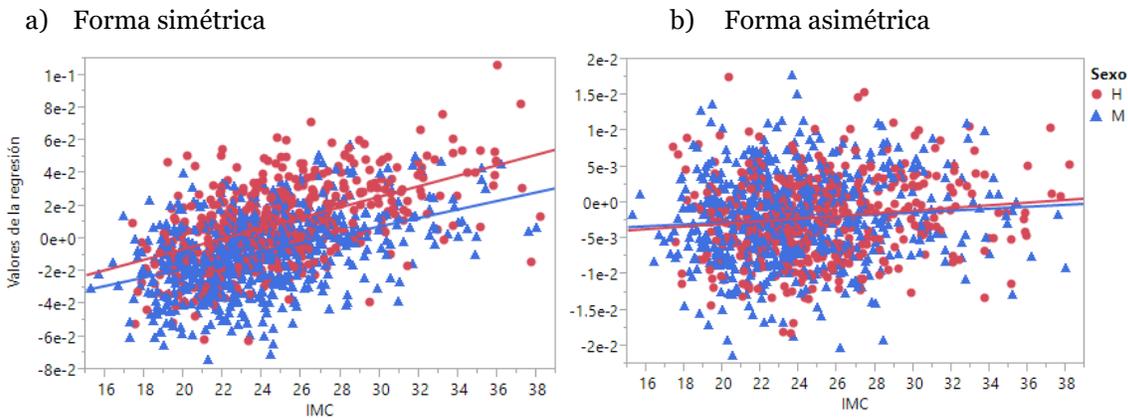
Las variables significativas son el sexo (0.90%,  $p<0.0001$ ) representado en la gráfica de la Figura 18b. La edad también es significativa para la forma asimétrica (0.83%,  $p<0.0001$ ) en la gráfica se observa que los grupo joven y adulto mayor varían más en los ajustes de la regresión, ver Figura 19b. Y, por último, el índice de masa corporal es significativo (0.14%,  $p=0.0186$ ) aunque la regresión no, Figura 20b.



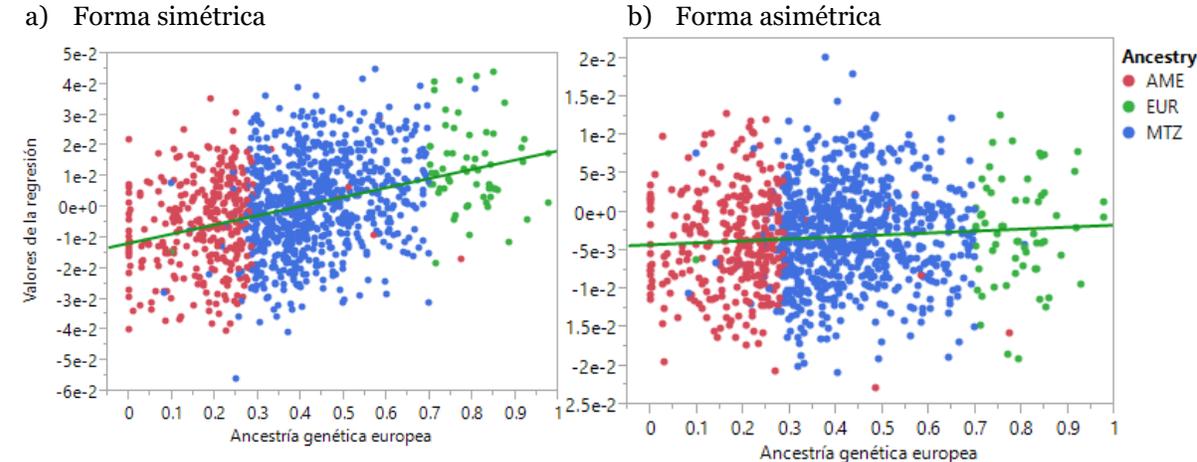
**Figura 18.** Gráficas sobre el sexo de los valores de las regresiones de la (a) forma simétrica, (b) forma asimétrica. Triángulos azules representan Mujeres, círculos rojos Hombres.



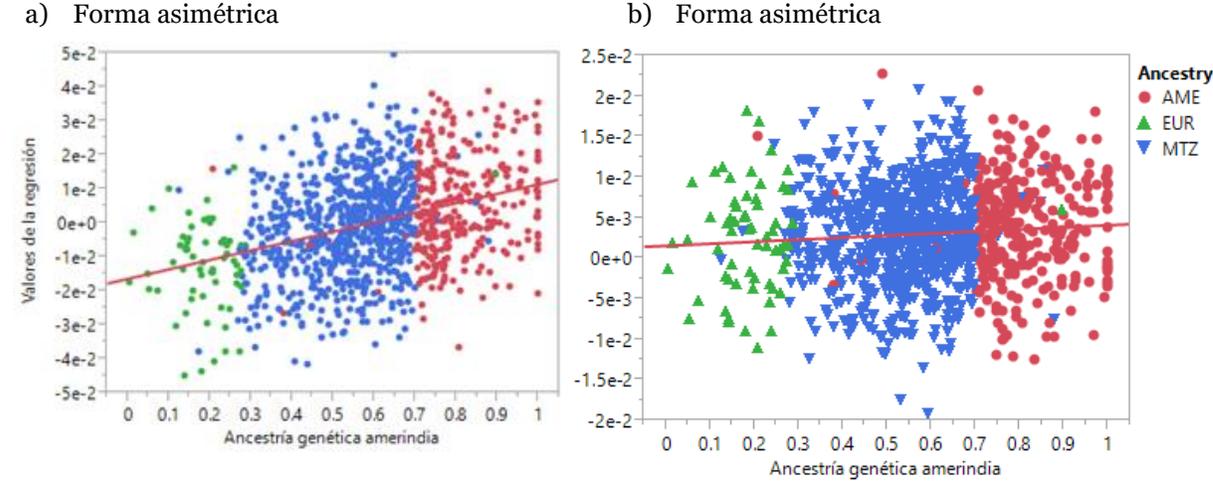
**Figura 19.** Gráfica sobre la edad de los valores de las regresiones de la (a) forma simétrica, (b) forma asimétrica. La línea gris representa el ajuste de regresión por edad. Las líneas punteadas muestran el ajuste por grupo de edad.



**Figura 20.** Gráfica sobre el índice de masa corporal (IMC) de los valores de las regresiones de la (a) forma simétrica, (b) forma asimétrica. Las líneas roja y azul muestran el ajuste de regresión por sexo.

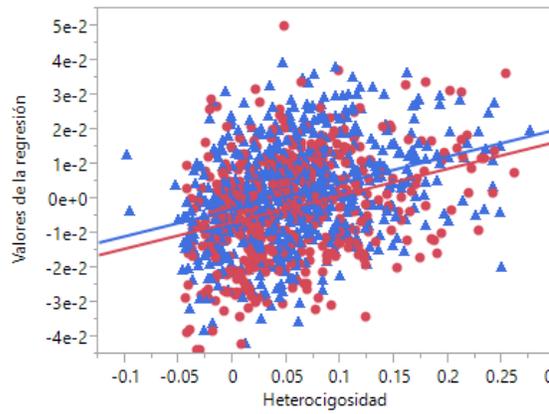


**Figura 21.** Gráfica sobre la ancestría genética europea de los valores de las regresiones de la (a) forma simétrica, (b) forma asimétrica. La línea verde muestra el ajuste de regresión de la ancestría europea.

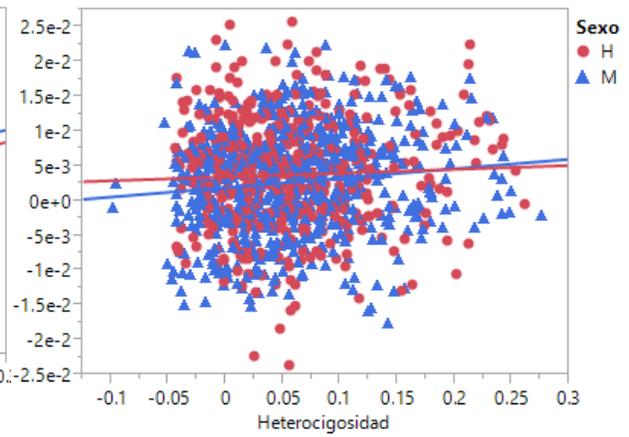


**Figura 22.** Gráfica sobre la ancestría genética amerindia de los valores de las regresiones de la (a) forma simétrica, (b) forma asimétrica. La línea roja muestra el ajuste de regresión de la ancestría amerindia.

a) Forma simétrica



b) Forma asimétrica



**Figura 23.** Gráfica sobre la heterocigosidad de los valores de las regresiones de la **(a)** forma simétrica, **(b)** forma asimétrica. Las líneas roja y azul muestran el ajuste de regresión por sexo.

## Morfoespacios: Análisis de Componentes Principales

### *Morfoespacio del componente simétrico de la forma*

En los análisis de PCA se obtuvieron 54 componentes principales que explican el 100% de la varianza, de ese porcentaje los tres primeros componentes explican el 46.13%, ver Figura 24d.

En la Figura 24 a, b, c, se observan tres gráficas de la variación de los individuos por región geográfica PC1 (20.80%), PC2 (16.16%) y PC3 (9.10%); las elipses que engloban el Sureste en el eje PC1 presentan la mayor variación y los individuos de la región Centro son los que cuentan con la menor variación.

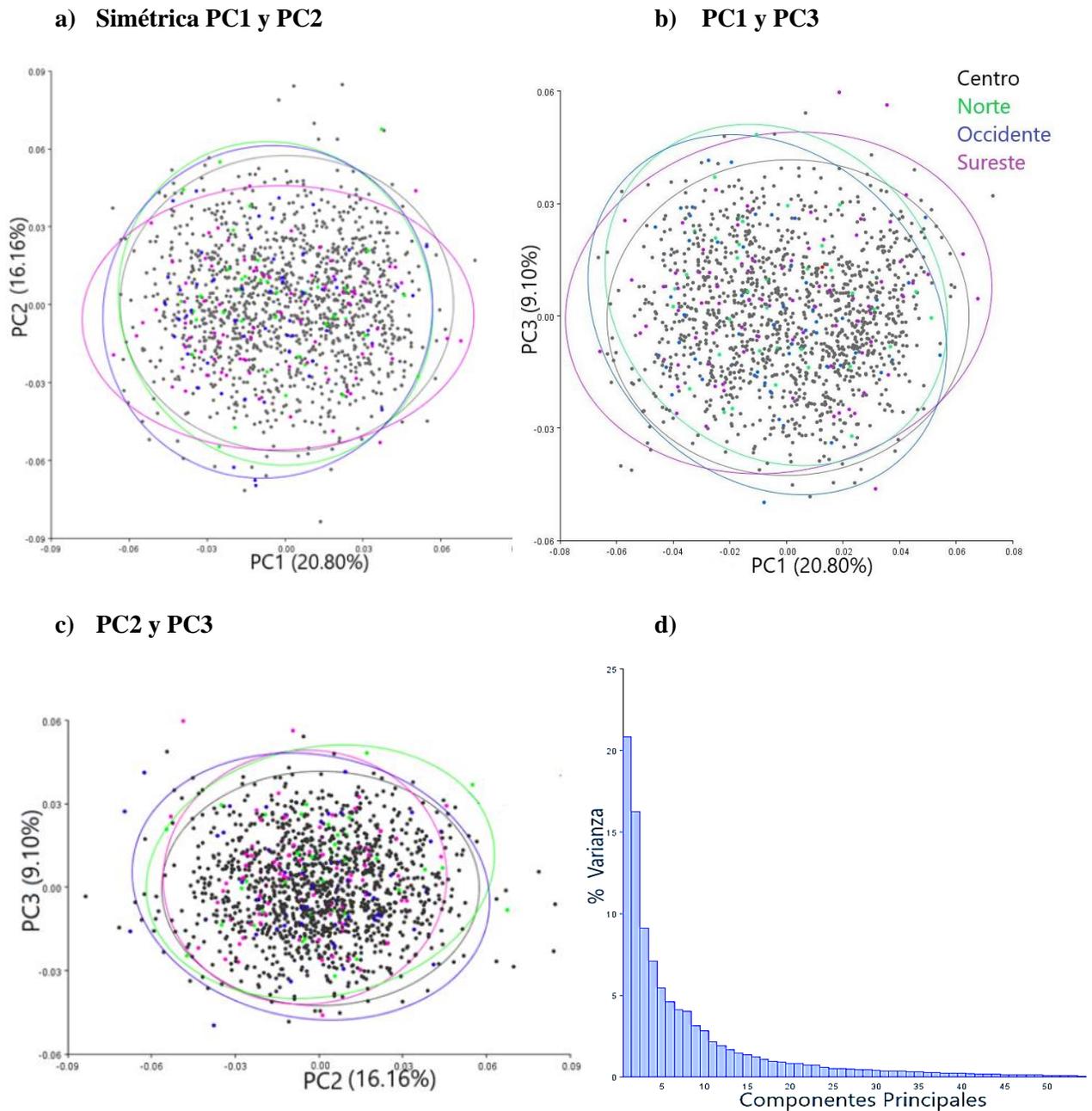
En los *wireframes* de la Figura 26 a, c, los cambios de forma asociados al eje PC1 se centran en el eje positivo en caras pequeñas y anchas. Y en el eje negativo las caras son alargadas. En ambos ejes las cejas, orejas y la nariz son las que presentaron mayor variación. El PC2 en el eje positivo la cara es alargada y en el negativo cara estrecha, se observan cambios más marcados en cejas, ojos y labios. Y el PC3 donde orejas, nariz y labios con los que varían en ambos ejes.

### *Morfoespacio del componente asimétrico de la forma*

En el PCA asimétrico se obtuvieron 47 componentes principales de los cuales los tres primeros explican el 37.97% de la variación total, Figura 25d.

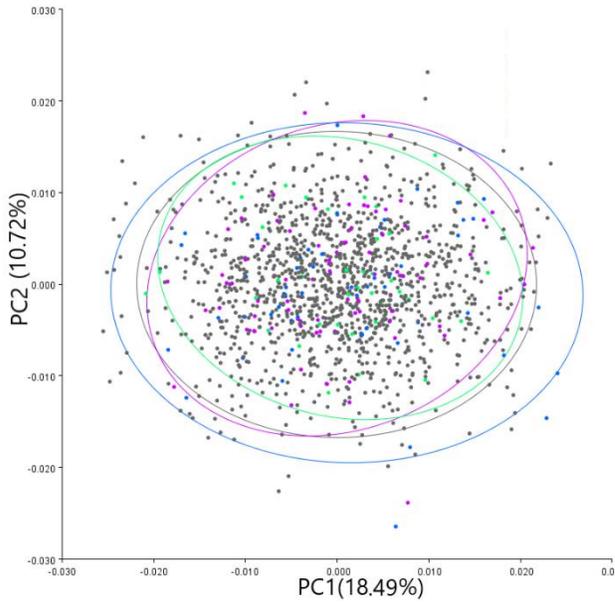
La Figuras 25 a, b, c muestra las tres gráficas de variación por región geográfica PC1 (18.49%), PC2 (10.72%) y PC3 (8.75%), donde se presentó la mayor variación fue en los individuos del Occidente, lo cual se observa en el eje PC1.

En la Figura 26 b, d, el cambio es generalizado en el PC1 en la asimetría de la punta de la nariz para ambos ejes, en el PC2 el cambio generalizado es una asimetría direccional en la mandíbula en ambos ejes, y en el PC3 la asimetría se presenta principalmente en las orejas.

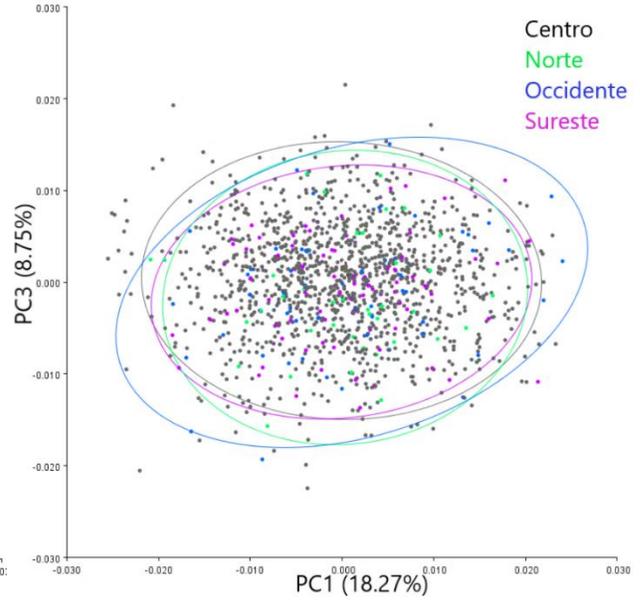


**Figura 24.** Gráficas de PCA, las elipses engloban la influencia de las regiones geográficas en la variación de la forma simétrica **a)** PC1 y PC2, **b)** PC1 y PC3, **c)** PC2 y PC3, **d)** Histograma de la varianza total de los componentes principales.

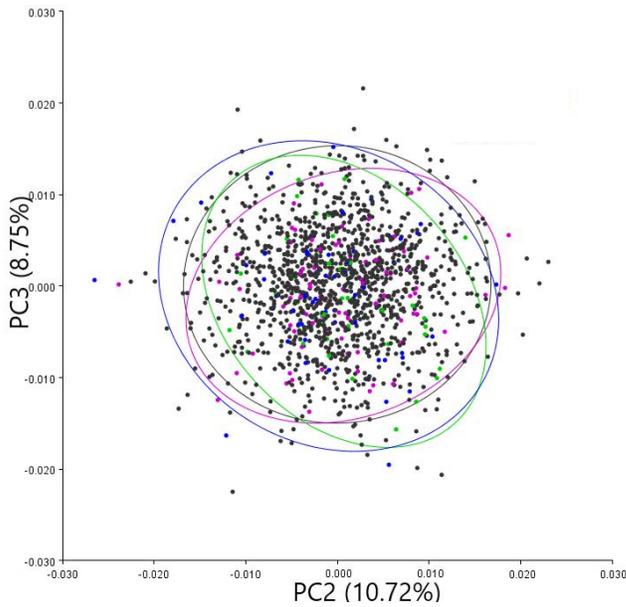
a) Asimétrica PC1 y PC2



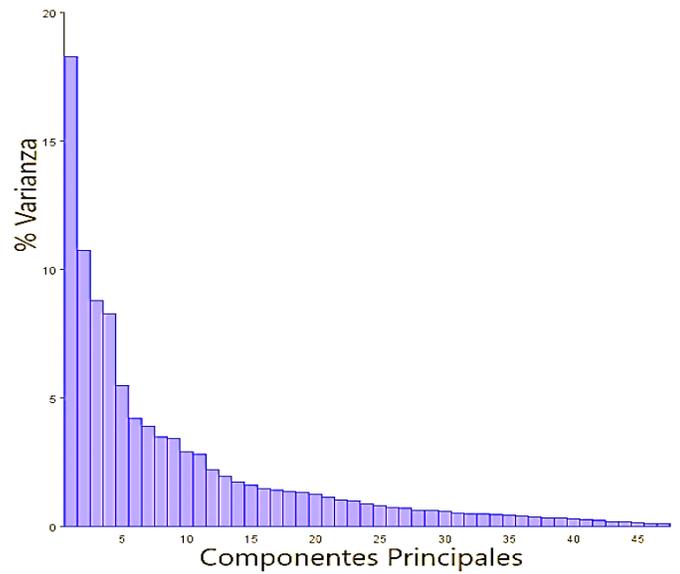
b) PC1 y PC3



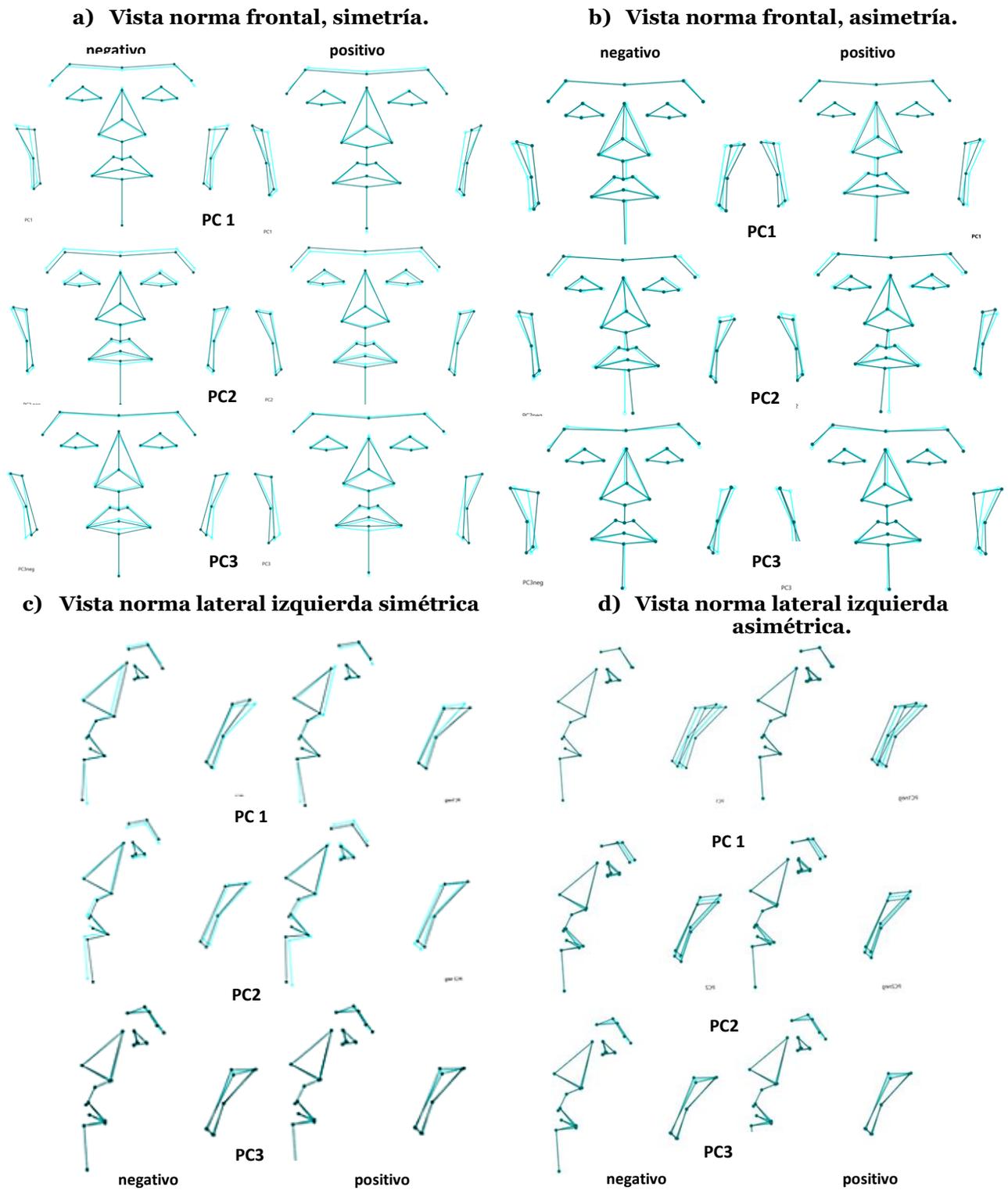
c) PC2 y PC3



d)



**Figura 25.** Gráficas de PCA, las elipses engloban la influencia de las regiones geográficas en la variación de la forma asimétrica a) PC1 y PC2, b) PC1 y PC3, c) PC2 y PC3, d) Histograma de la varianza total de los componentes principales.



**Figura 26.** Caracterización del cambio de la cara de los PC1, PC2 y PC3 en eje negativo y eje positivo. **a)** Vista norma frontal forma simétrica. **b)** Vista norma frontal forma asimétrica. **c)** Vista norma lateral izquierda simétrica. **d)** Vista norma lateral izquierda asimétrica.

## Integración morfológica como *proxy* de la variabilidad modular

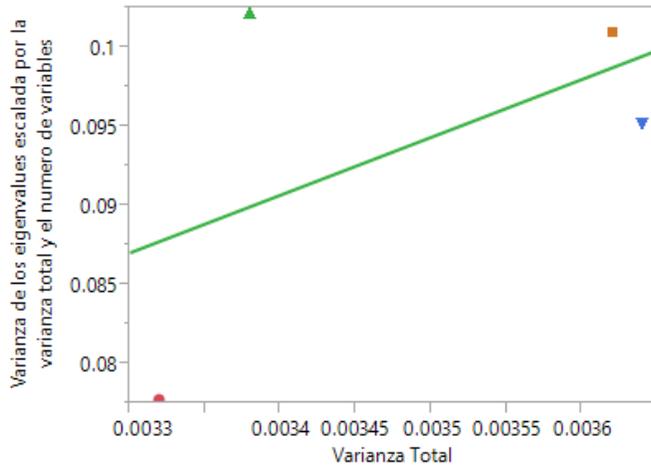
En la Tabla 6 se resumen los resultados de la varianza total ( $V_t$ ), la varianza de los *eigenvalues* ( $V_e$ ) y la varianza de los *eigenvalues* escalada por la varianza y el número de variables ( $V_{env}$ ); de los diversos análisis de PCA en la caracterización de la forma facial del anidado por zona geográfica. Los individuos del Sureste presentan en la forma simétrica ( $V_t= 0.00362$ ,  $V_e= 2.405E-08$ ), los del Occidente ( $V_t=0.00364236$ ,  $V_e=2.293E-08$ ), del Norte ( $V_t=0.00338846$ ,  $V_e=2.132E-08$ ) y Centro ( $V_t=0.00332613$ ,  $V_e=1.562E-08$ ). Y en la forma asimétrica los individuos del Sureste presentaron una ( $V_t= 0.000443$ ,  $V_e= 2.36E-10$ ), Occidente ( $V_t=0.000520$ ,  $V_e=4.85E-10$ ), Norte ( $V_t=0.000452$ ,  $V_e=3.02E-10$ ) y Centro ( $V_t=0.000433$ ,  $V_e=2.10E-10$ ).

**Tabla 6.** Estadísticos de los PCA simétrico y asimétrico por región geográfica.

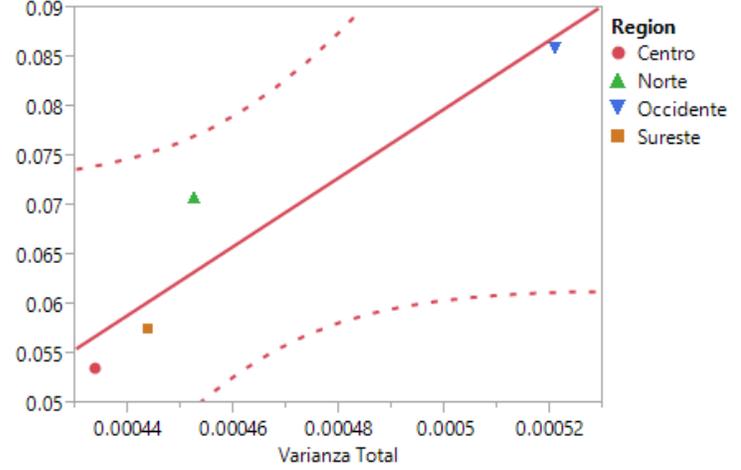
PCA		SIMÉTRICO			ASIMÉTRICO		
		Varianza total ( $V_t$ )	Varianza <i>eigenvalue</i> ( $V_e$ )	Varianza de los <i>eigenvalues</i> escalada por la varianza y el número de variables ( $V_{env}$ )	Varianza total ( $V_t$ )	Varianza <i>eigenvalue</i> ( $V_e$ )	Varianza de los <i>eigenvalues</i> escalada por la varianza y el número de variables ( $V_{env}$ )
Zona Geográfica	Norte	0.00338846	2.132E-08	0.10221	0.000452	3.02E-10	0.07077
	Occidente	0.00364236	2.293E-08	0.0951	<b>0.000520</b>	<b>4.85E-10</b>	0.08585
	Centro	0.00332613	1.562E-08	0.07769	0.000433	2.10E-10	0.05351
	Sureste	<b>0.00362</b>	<b>2.405E-08</b>	0.10097	0.000443	2.36E-10	0.05752

En la gráfica de la regresión de la forma simétrica de la Figura 27a, si bien se muestra un ajuste lineal positivo, cuando se calcula el intervalo de confianza resulta que este modelo no se ajusta. Y en la regresión lineal de la forma asimétrica, Figura 27b, tiene un buen ajuste el modelo y los individuos se integran dentro de los intervalos de confianza. Aquí la región Norte es la que presenta mayor varianza fenotípica de las otras tres regiones.

a) Forma simétrica



b) Forma asimétrica

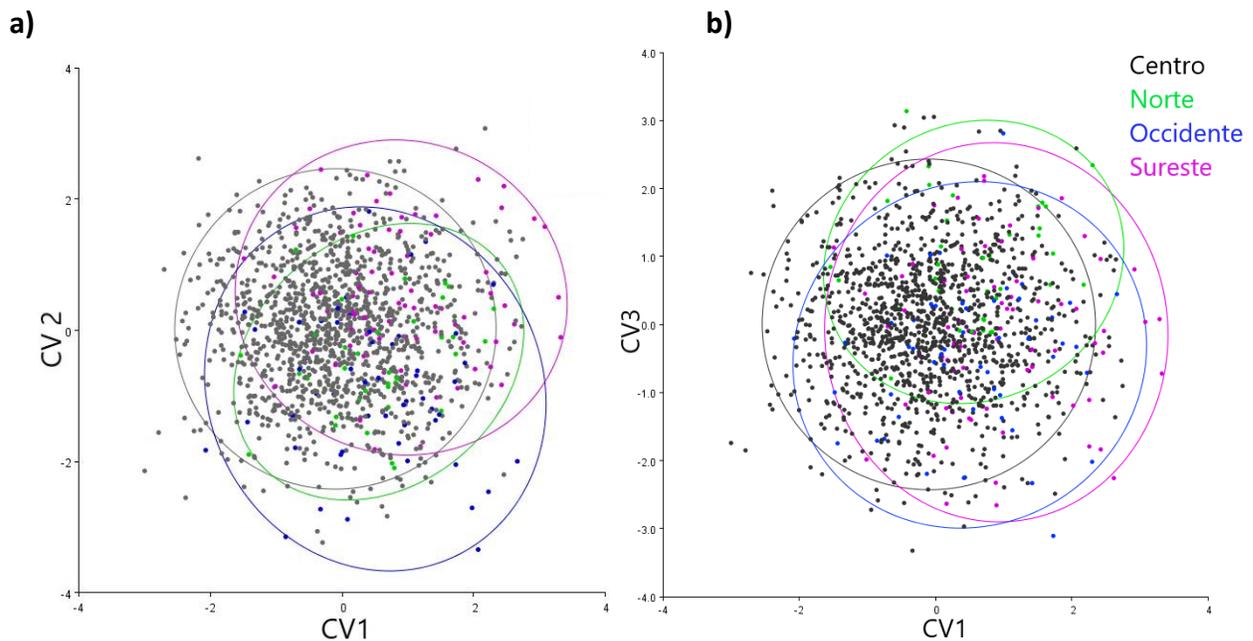


**Figura 27.** Regresión lineal de la varianza de los *eigenvalues* escalada por la varianza total y el número de variables y la varianza total fenotípica para la muestra total y la submuestra de zona geográfica. **a)** Componente simétrico de la forma, **b)** Componente asimétrico. Línea negra representa el ajuste del modelo y la línea curva discontinua el intervalo de confianza  $\alpha$  0.01.

## Variación entre grupos: Análisis de Variación Canónica

### *Morfoespacio simétrico de la forma*

La Tabla 7 presenta la varianza de los eigenvalores de CV1 (46.7%), CV2 (33.2%) y CV3 (20.1%). En la gráfica de la Figura 28a, se observa en el eje CV2 la elipse de la región de Occidente se desplaza hacia valores negativos y la elipse que engloba los individuos del Sureste se desplazan hacia valores positivos. En la Figura 28b en el eje CV3 los individuos de la región Norte se desplazan hacia valores positivos. Los individuos del Centro, en ambas gráficas, son los que menor variación presentan con respecto de las demás regiones. Las distancias Mahalanobis entre los grupos, ver Tabla 8, mostraron que el grupo de los individuos del Centro presentan diferencias significativas con los individuos del Occidente (1.1854,  $p=0.0492$ ) y con la región Sureste (1.1056,  $p= 0.0004$ ). Y los individuos del Norte (1.2404,  $p=0.3613$ ) no se diferencian con ninguno de los demás grupos.



**Figura 28.** Gráficas de variación canónica (CV) por zona geográfica, **a)** eje CV1 explica el 46.7% y el eje CV2 33.1% de la varianza, **b)** el eje CV3 20.1% de la varianza. Las elipses engloban el 95% de la varianza.

**Tabla 7.** Varianza de CVA por zona geográfica

CVA GEO	Valores propios	% Varianza	% Acumulado
1	0.07410343	46.703	46.703
2	0.05266654	33.193	79.896
3	0.03189843	20.104	100.00

**Tabla 8.** Distancia Mahalanobis entre grupos (P-valor). En rojo las distancias significativas.

	Centro	Norte	Occidente
<b>Norte</b>	1.2404 (0.3613)		
<b>Occidente</b>	1.1854 (0.0492)	1.4350 (0.8734)	
<b>Sureste</b>	1.1056 (0.0004)	1.4613 (0.5201)	1.4919 (0.0972)

En la Figura 29 se muestran los diferentes *wireframes* de los cambios generalizados en la forma fenotípica. Las características asociadas al eje positivo CV1, en la región ocular los pliegues palpebrales componen ojos pequeños. En la región nasal, en vista frontal la nariz es corta y ancha, y en vista lateral es cóncava. En la región labial, en vista frontal, el labio superior presenta arco de cupido pronunciado y el labio inferior es delgado, y en vista lateral el perfil es convexo. En la región auricular, en vista frontal las orejas son anchas en las hélices. El tercio superior facial, en vista frontal es más alto, el tercio medio es corto y el tercio inferior es alto, y en vista lateral la región superciliar es pronunciada. Y en el eje CV1 negativo, la región ocular ambos pliegues palpebrales presentan ojos grandes. En la región nasal, en vista frontal la nariz es alargada y en vista lateral convexa. En la región labial, en vista frontal, ambos labios son gruesos; en vista lateral, el perfil es cóncavo. En la región auricular, en vista frontal las orejas son estrechas en hélices y lóbulo. El tercio superior facial en vista frontal es estrecho, el tercio medio es alto y el tercio inferior es corto; en vista lateral la región superciliar se inclina posteriormente.

Los cambios de forma del eje CV2 positivo en la región ocular el pliegue epicanto desciende y el ángulo lateral del ojo asciende. En la región nasal, en vista frontal, la nariz es ancha, en vista lateral es recta. En la región labial, en vista frontal los labios son voluminosos y protuberantes; en vista lateral el perfil es convexo. En la región auricular, las orejas son estrechas en las hélices y los lóbulos. El tercio superior facial, en vista frontal, es corto y el tercio inferior es alto; en vista lateral la región

superciliar se inclina posteriormente. En el eje CV2 negativo en la región ocular el ángulo medial del ojo asciende y el ángulo lateral desciende. La región nasal, en vista frontal, la nariz es delgada; en vista lateral es recta con gran proyección anterior. En la región labial, en vista frontal el labio superior presenta arco de cupido definido, ambos labios son muy delgados; en vista lateral el perfil es cóncavo. En la región auricular, en vista frontal las orejas presentan hélices y lóbulos medios. El tercio superior facial, en vista frontal, es alto, el tercio inferior es alto; en vista lateral la región superciliar es pronunciada.

Los cambios generalizados en el fenotipo del eje CV3 positivo en la región ocular el pliegue del palpebral superior es paralelo a la curva del ojo. En la región nasal en vista lateral es recta con pequeña proyección en la punta. En la región labial, en vista frontal en el labio superior arco de cupido definido, labios medianos; en vista lateral el perfil es recto. En la región auricular, en vista frontal las orejas son estrechas y alargadas. El tercio superior, en vista frontal es corto; en vista lateral la región superciliar se inclina anteriormente. En el eje CV3 negativo, en la región ocular el pliegue epicanto se recorre más hacia la parte medial. En la región nasal, en vista frontal, la nariz es ancha y en vista lateral es cóncava con punta alta. En la región labial, en vista frontal, los labios son gruesos; en vista lateral el perfil es recto. En la región auricular, en vista frontal las orejas son cortas y anchas en hélices y lóbulos. Los tercios de la cara en vista frontal son proporcionales, en vista lateral la región superciliar se inclina posteriormente.

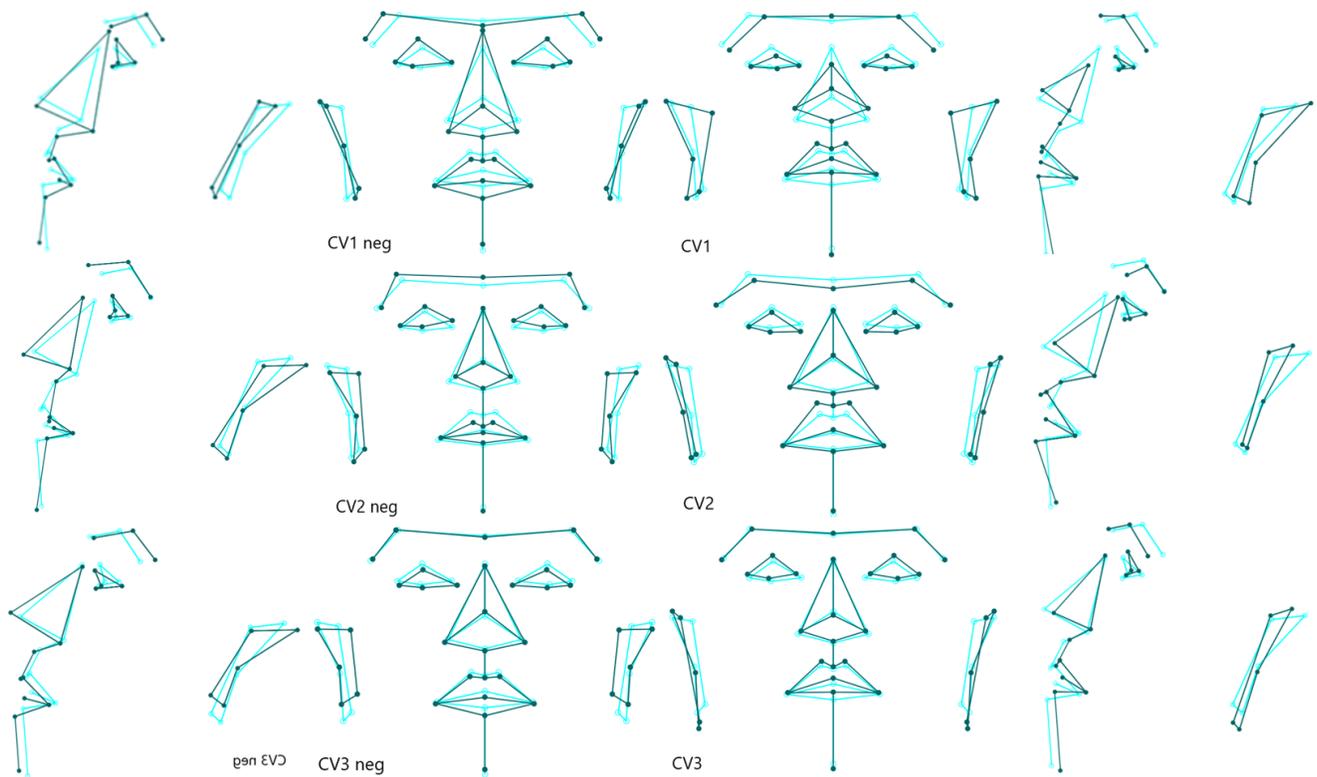
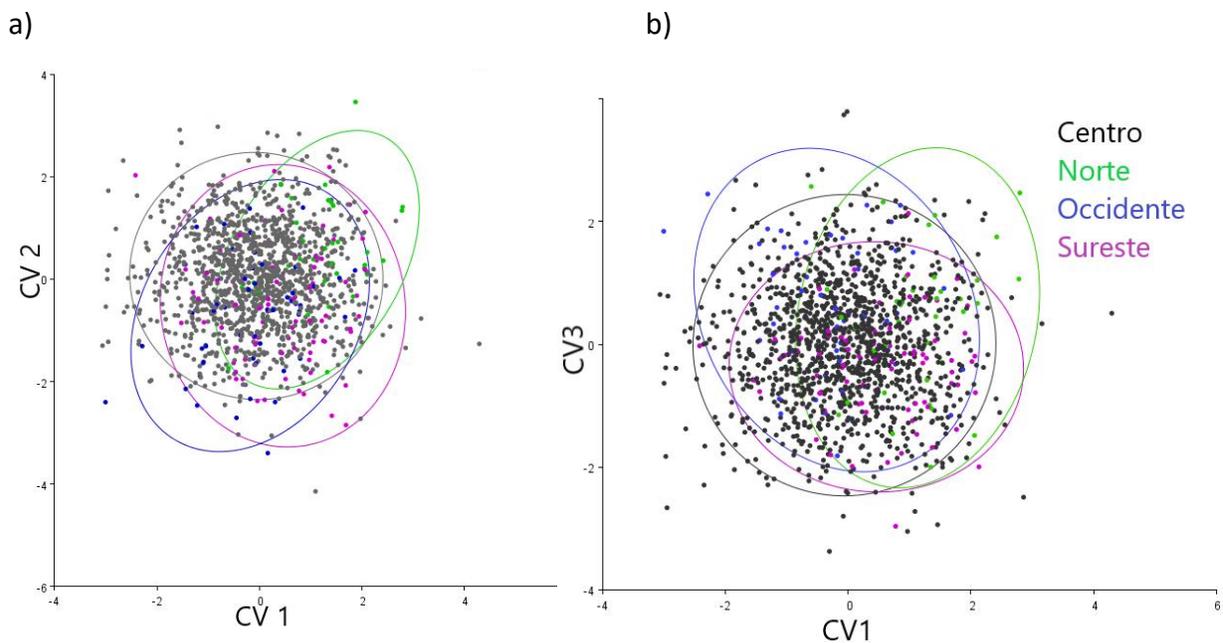


Figura 29. Caracterización del cambio facial simétrico de acuerdo con la variación canónica. Los *wireframes* CV1, CV2, CV3 de la izquierda son del eje negativo en vista norma frontal y norma lateral izquierda. Los *wireframes* CV1, CV2, CV3 de la derecha son del eje positivo en vista norma frontal y norma lateral derecha.

### *Morfoespacio asimétrico de la forma*

En los análisis de variación canónica para la forma asimétrica, la varianza de los eigenvalores del CV1 (43.8%), CV2 (35%) y CV3 (21%), ver Tabla 9. En la gráfica de la Figura 30a, en el eje CV1 se observa que los individuos del Norte y Sureste se desplazan hacia valores positivos y los del Occidente hacia valores negativos. Y en la gráfica de la Figura 30b, se ve la separación la región Norte hacia valores positivos en el eje CV1 y en el eje CV3. Los resultados de la Tabla 10 de las distancias Mahalanobis entre grupos mostraron que sólo los individuos del Norte tienen diferencia significativa, aunque limítrofe, con los individuos del Centro (1.3142,  $p=0.0468$ ).



**Figura 30.** Gráficas de variación canónica (CV) por zona geográfica, **a)** eje CV1 explica el 43.8% y el eje CV2 35 de la varianza, **b)** el eje CV3 20.1% de la varianza. Las elipses engloban el 95% de la varianza.

**Tabla 9.** Varianza de CVA por zona geográfica

CVA GEO	Valores propios	% Varianza	% Acumulado
1	0.05247403	43.891	43.891
2	0.04186670	35.018	78.909
3	0.02521531	21.091	100.00

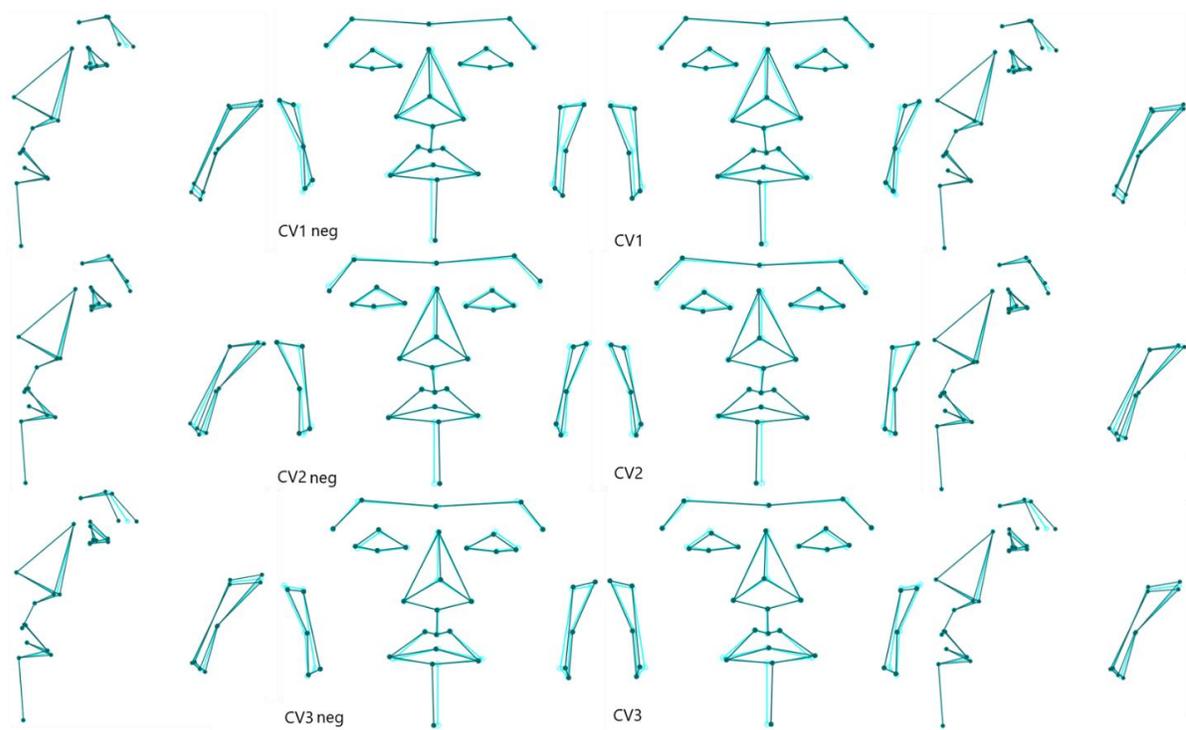
**Tabla 10.** Distancias Mahalanobis entre los grupos (P-valor). En rojo las distancias significativas.

	Centro	Norte	Occidente
Norte	1.3142 (0.0468)		
Occidente	0.9622 (0.4600)	1.7172 (0.0957)	
Sureste	0.8500 (0.1711)	1.3769 (0.4702)	1.1448 (0.7886)

En la Figura 31 se muestran los diferentes *wireframes* de los cambios generalizados en la forma fenotípica. Las características asociadas al eje CV1 negativo se observan en la región nasal, vista frontal, donde la punta de la nariz se desplaza lateralmente hacia la derecha. En la región labial, el arco de cupido es asimétrico, el labio inferior se desplaza lateralmente hacia la izquierda. Y en el eje CV1 positivo en la región nasal, la punta de la nariz se desplaza lateralmente hacia la izquierda. En la región labial, el arco de cupido es asimétrico, el labio inferior se desplaza lateralmente hacia la derecha.

El eje CV2 negativo, la región nasal en vista frontal la punta de la nariz se desplaza lateralmente hacia la izquierda. En la región labial, el arco de cupido es asimétrico y el labio inferior se desplaza lateralmente a la izquierda. En el tercio inferior facial, la mandíbula se desplaza hacia la izquierda. Y en el eje CV2 positivo la región nasal en vista frontal la punta de la nariz se desplaza lateralmente hacia la derecha. En la región labial, el arco de cupido es asimétrico y el labio inferior se desplaza lateralmente a la derecha. En el tercio inferior facial, la mandíbula se desplaza hacia la derecha.

En el eje CV3 negativo, la región nasal en vista frontal la punta de la nariz se desplaza lateralmente hacia la izquierda. En la región labial, el labio inferior se desplaza lateralmente a la derecha. Y en el eje CV3 positivo la región nasal la punta de la nariz se desplaza lateralmente hacia la derecha. En la región labial, el labio inferior se desplaza lateralmente a la izquierda.



**Figura 31.** Caracterización del cambio facial asimétrico de acuerdo con la variación canónica. Los *wireframes* CV1, CV2, CV3 de la izquierda son del eje negativo en norma vista frontal y norma lateral izquierda. Los *wireframes* CV1, CV2, CV3 de la derecha son del eje positivo en norma vista frontal y norma lateral izquierda.

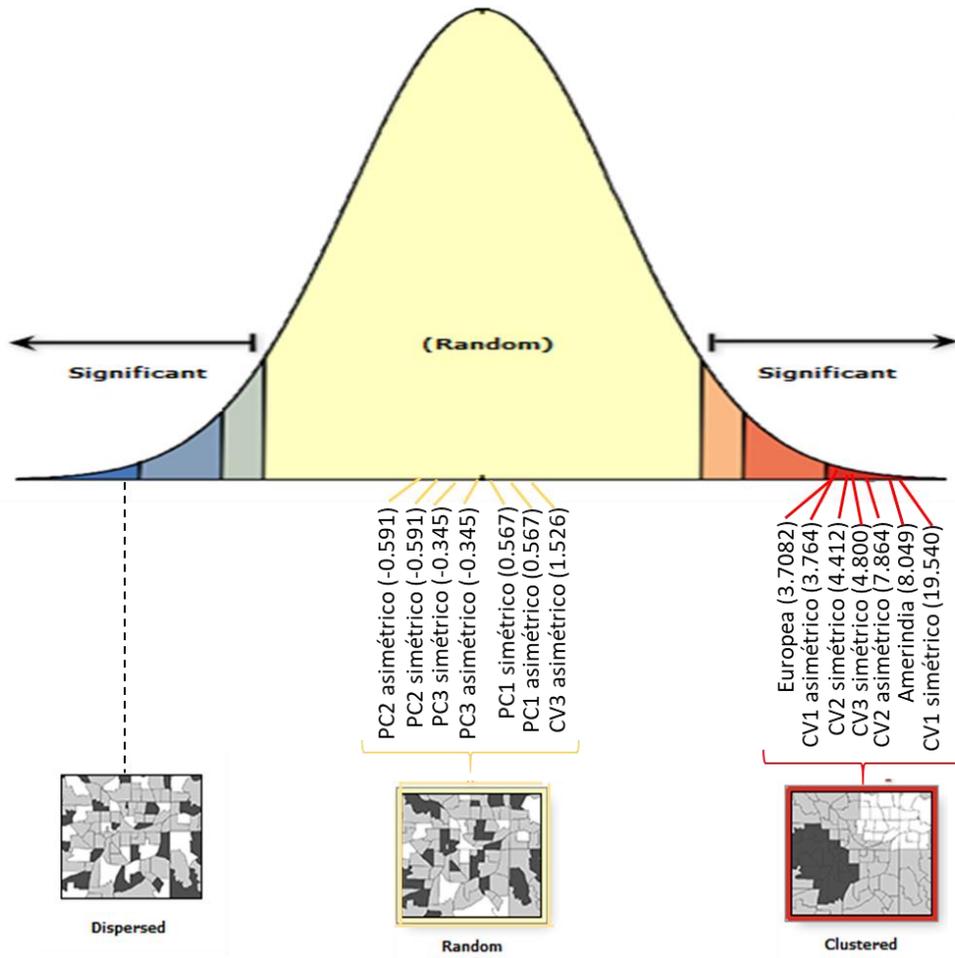
## Autocorrelación espacial: Índice de Moran

La puntuación de los índices de Moran mostraron que ambas ancestrías tanto la amerindia como la europea resultaron ser significativas en su distribución espacial, al igual que los tres CVA simétricos y dos asimétricos. En cambio, los índices de los PCA de ambas simetrías no resultan ser significativas para los análisis de espacio, ver Tabla 11.

**Tabla 11.** Valores del índice de Moran para ancestría y los tres primeros PCA y CVA.

	Índice de Moran	Índice esperado	Puntuación Z	Valor p
<b>Ancestría genética europea</b>	0.000962	-0.000723	3.708	0.000209
<b>Ancestría genética amerindia</b>	0.002933	-0.000723	8.049	<0.0001
<b>PC1 Simétrico</b>	-0.000465	-0.000723	0.567	0.570091
<b>PC2 Simétrico</b>	-0.000992	-0.000723	-0.591	0.553918
<b>PC3 Simétrico</b>	-0.000879	-0.000723	-0.345	0.729935
<b>PC1 Asimétrico</b>	-0.000465	-0.000723	0.567	0.570091
<b>PC2 Asimétrico</b>	-0.000992	-0.000723	-0.591	0.553918
<b>PC3 Asimétrico</b>	-0.000879	-0.000723	-0.345	0.729935
<b>CV1 Simétrico</b>	0.008158	-0.000723	19.540	<0.0001
<b>CV2 Simétrico</b>	0.001283	-0.000723	4.412	0.00001
<b>CV3 Simétrico</b>	0.00146	-0.000723	4.800	0.000002
<b>CV1 Asimétrico</b>	0.000989	-0.000723	3.764	0.000167
<b>CV2 Asimétrico</b>	0.002852	-0.000723	7.864	<0.0001
<b>CV 3 Asimétrico</b>	-0.000028	-0.000723	1.526	0.126787

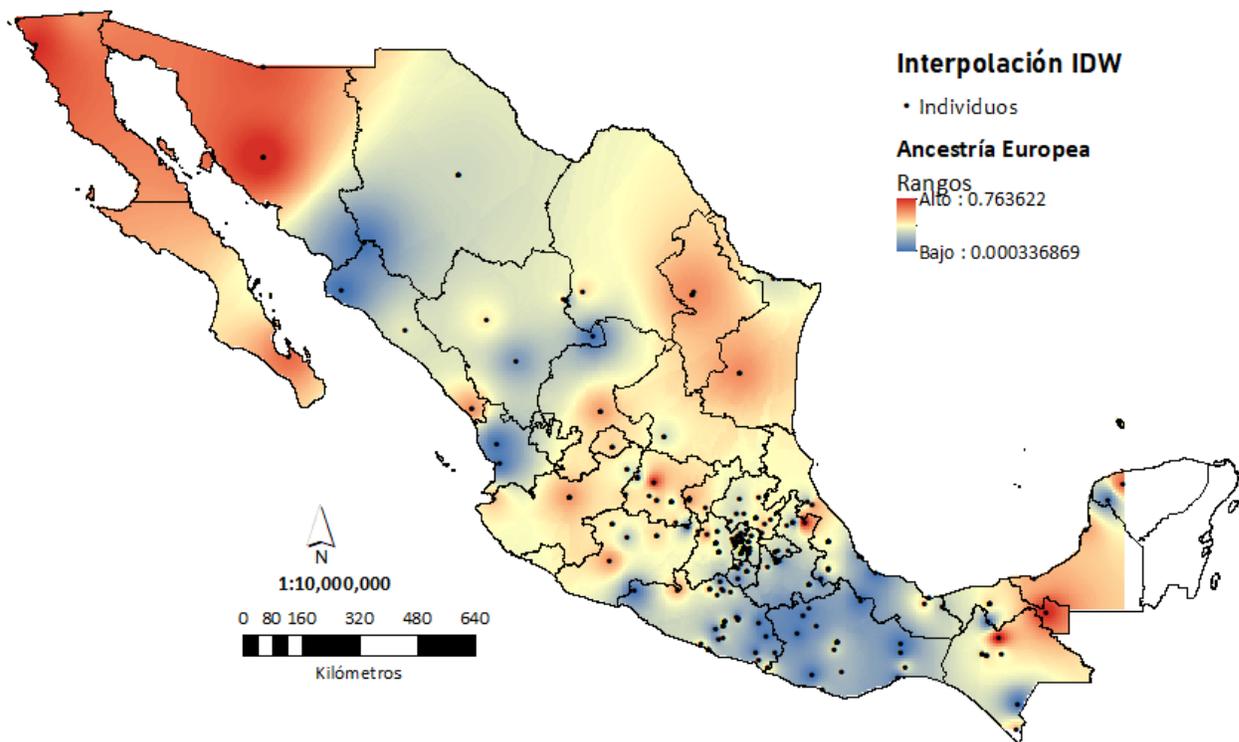
Tanto para las ancestrías genéticas europea y amerindia, así como los CVA la autocorrelación espacial mostró tipos de variación facial en patrones agrupados (*clustered*) a nivel del territorio mexicano, como se observa en la Figura 32. En cambio, los PCA simétricos, asimétricos y el CV3 asimétrico, el patrón de agrupamiento de variación es aleatorio (*random*), ver la Figura 32.



**Figura 32.** Informe de las desviaciones estándar de la puntuación Z la forma de la cara, basado en los PCA y CVA simétrico y asimétrico.

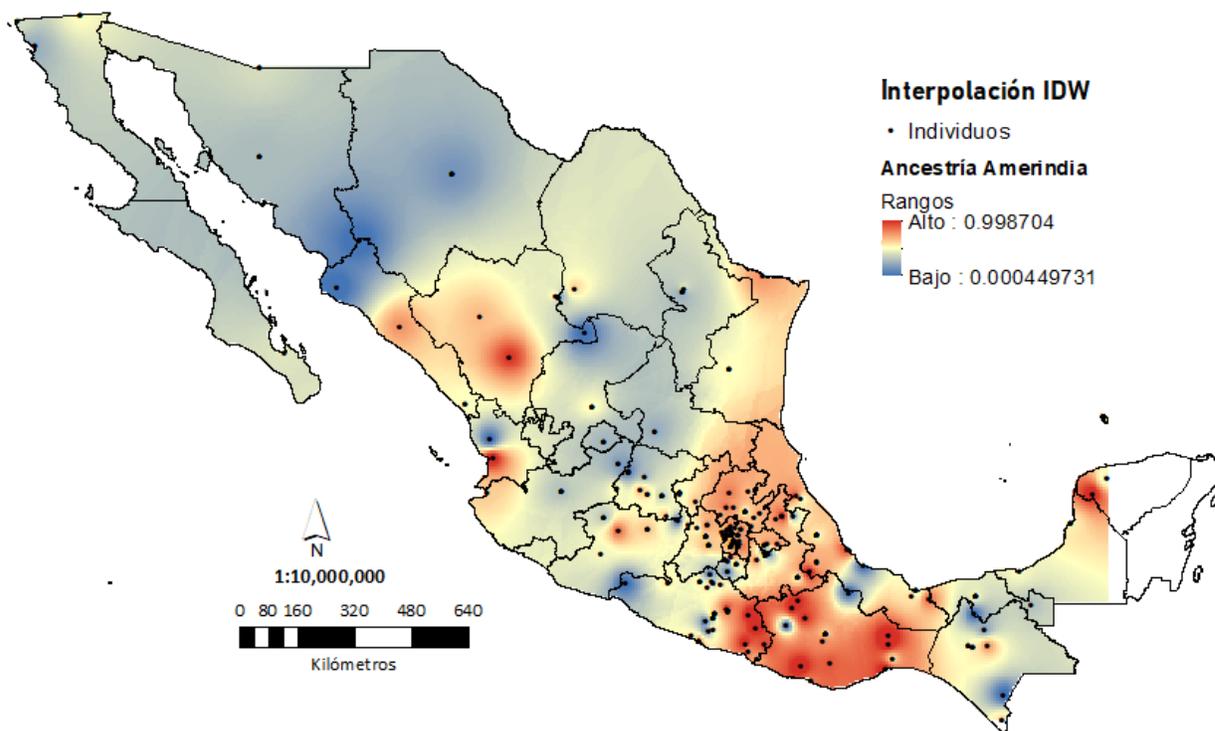
## Interpolación geoespacial IDW

En los resultados de la interpolación donde se analiza la ancestría genética europea, Figura 33, los valores más altos (0.763622) se encuentran en la región del Norte en los estados de Sonora, Baja California, Baja California Sur; y en la región del Occidente tiende hacia valores altos; y en el Sureste en Campeche y Yucatán. En cambio los valores bajos (0.000336869) están en la región del Centro en general y el Sureste; en el Norte, Sinaloa, Nayarit y Durango.



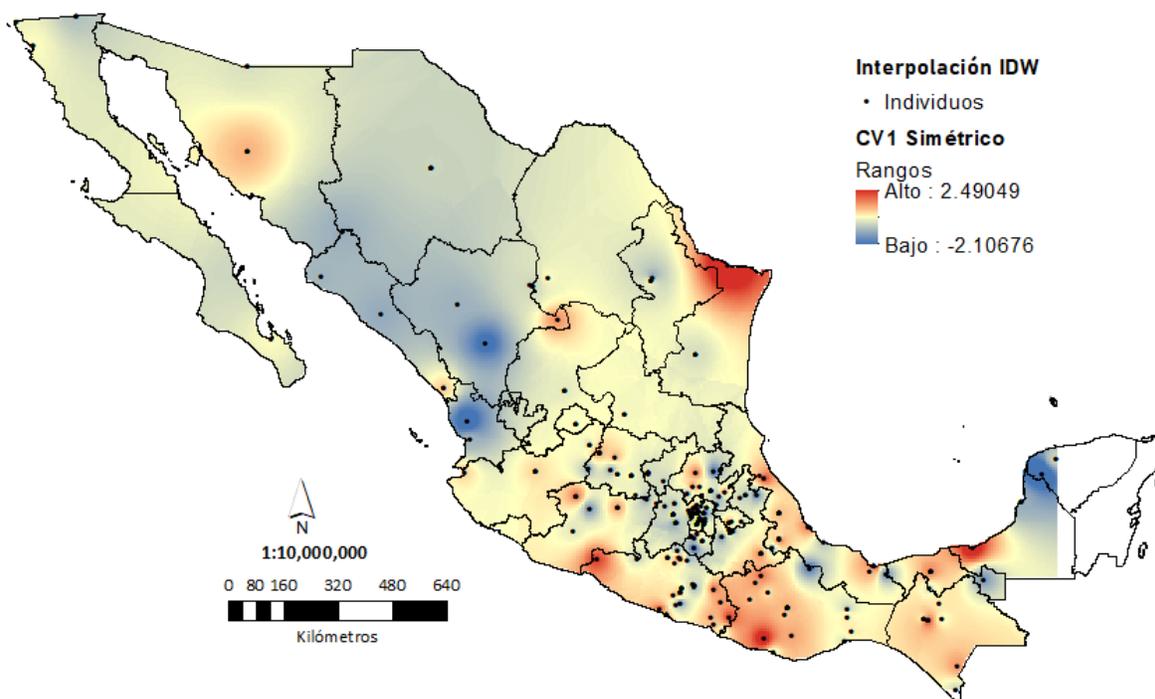
**Figura 33.** Mapa de interpolación IDW. Pondera los valores de la ancestría genética europea, los rangos altos de la ponderación se marcan en rojo y los rangos bajos en azul.

En contraparte, en el mapa de la interpolación para la ancestría genética amerindia los rangos altos (0.998704) se encuentran principalmente en Sureste en los estados de Oaxaca, Yucatán y Veracruz; y en la región Centro en Puebla, Tlaxcala, Hidalgo y Estado de México; en el Norte, Sinaloa, Durango y Nayarit. Y los rangos bajos (0.000336869) se distribuyen en la región Norte y Occidente, ver Figura 34.



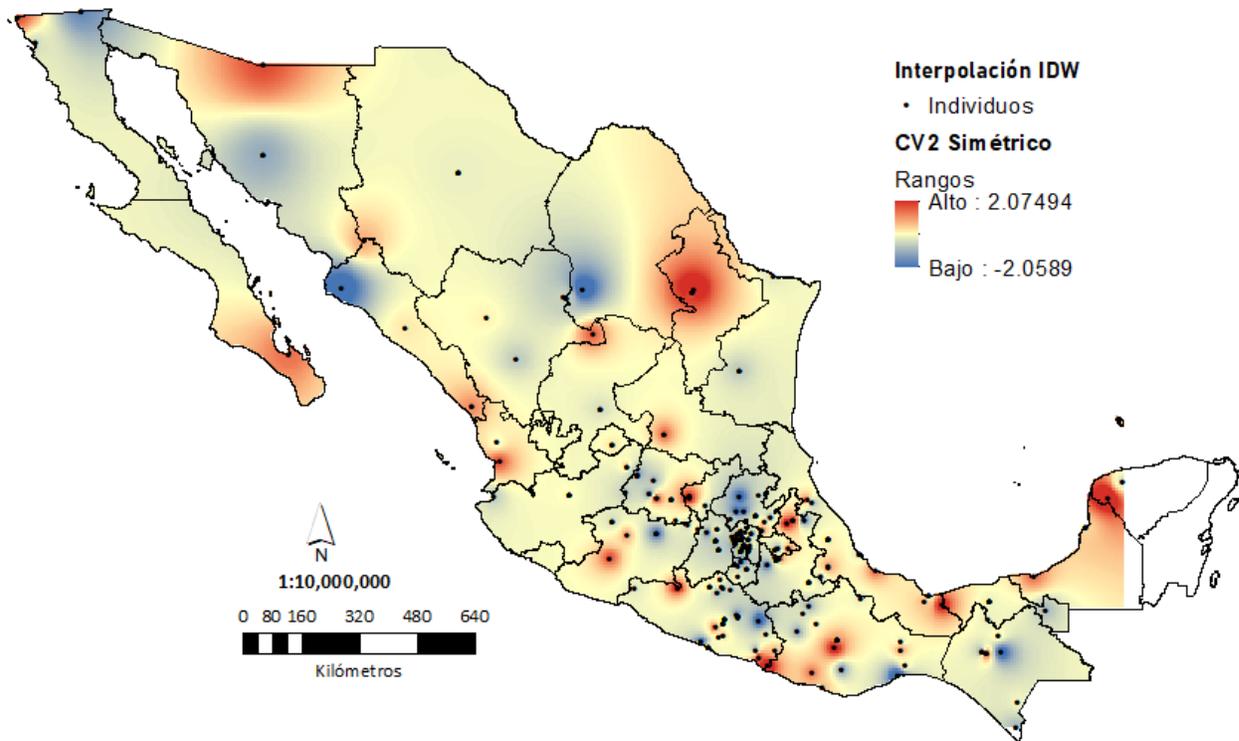
**Figura 34.** Mapa de interpolación IDW. Pondera los valores de la ancestría genética amerindia, los rangos altos de la ponderación se marcan en rojo y los rangos bajos en azul.

Los ráster presentados se basan en los resultados de la Puntuación Z, por lo tanto, sólo se plasman los mapas con valores significativos y se describe en general los rangos altos. En el mapa de los CV1 simétricos, Figura 35, los rangos altos (2.49049) fueron en los estados colindantes con el Golfo de México como Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y parte de Campeche. Y en los estados costeros del pacífico Chiapas, Oaxaca, Guerrero y al norte Sonora.



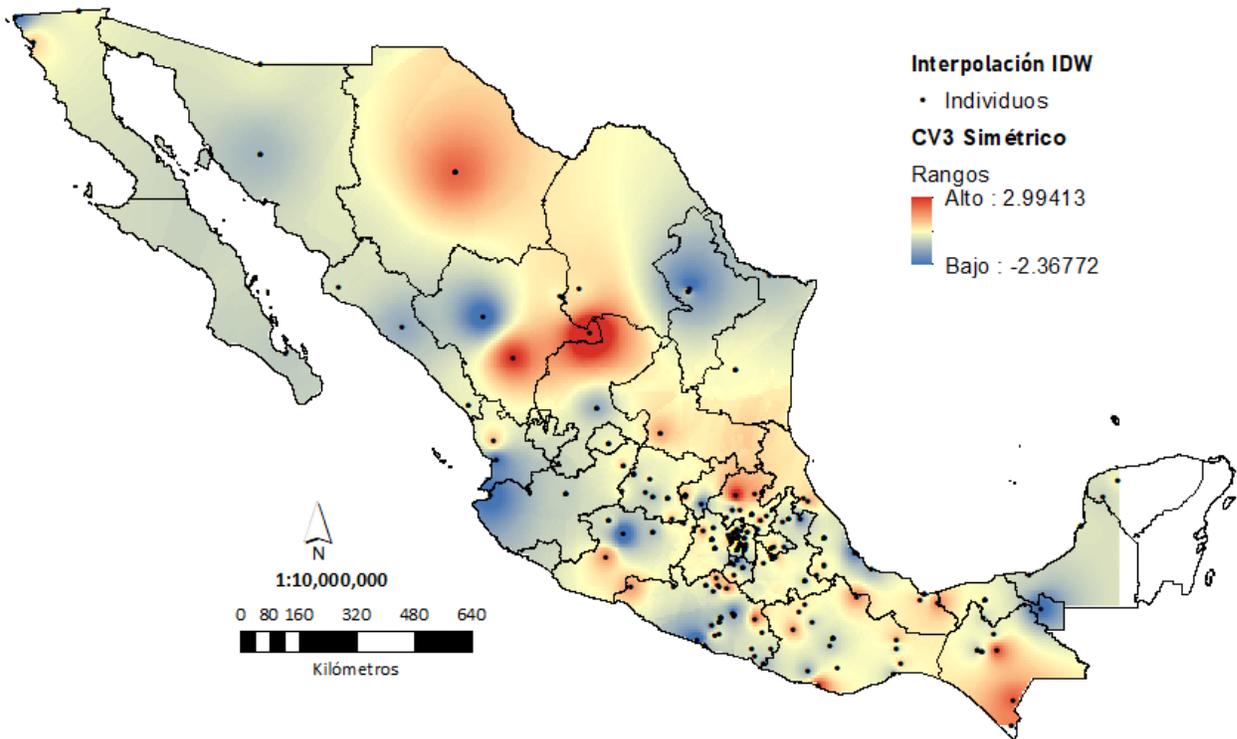
**Figura 35.** Mapa de interpolación IDW. Pondera los valores de CV1 simétrico, los rangos altos de la ponderación se marcan en rojo y los rangos bajos en azul.

En el CV2 simétrico los rangos altos (2.07494) se distribuyeron a largo de todo el país, en la región Norte en Baja California, Sonora, Nuevo León, San Luis Potosí; en occidente Nayarit, Querétaro, Michoacán; y Sureste como Oaxaca Veracruz, Campeche, Yucatán. Sin embargo, en el Centro esta variación canónica no es representativa del Centro del país, como se observa en la Figura 36.



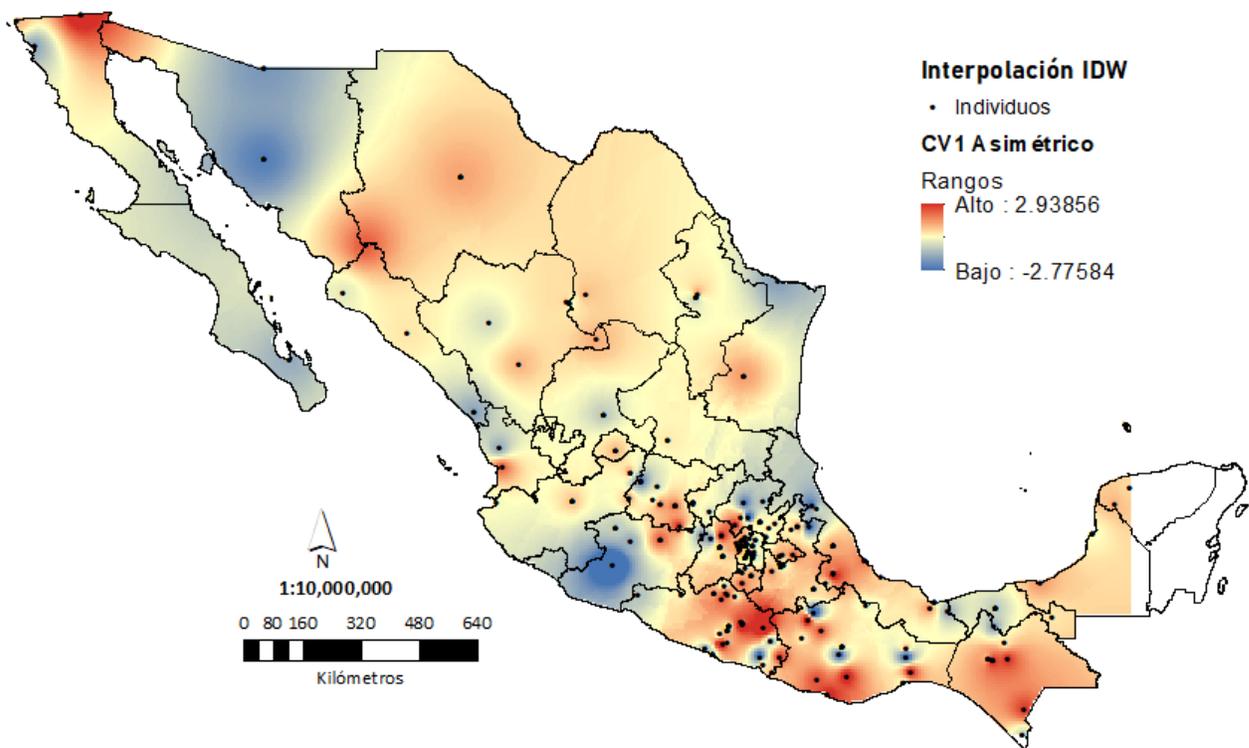
**Figura 36.** Mapa de interpolación IDW. Pondera los valores de CV2 simétrico, los rangos altos de la ponderación se marcan en rojo y los rangos bajos en azul.

En el CV3 simétrico los rangos altos (2.99413) los presenta en el Norte como Chihuahua, Durango, Zacatecas y San Luis Potosí; la región Centro Hidalgo, Estado de México, CDMX, Tlaxcala; en el Sureste Oaxaca y Chiapas, ver Figura 37.



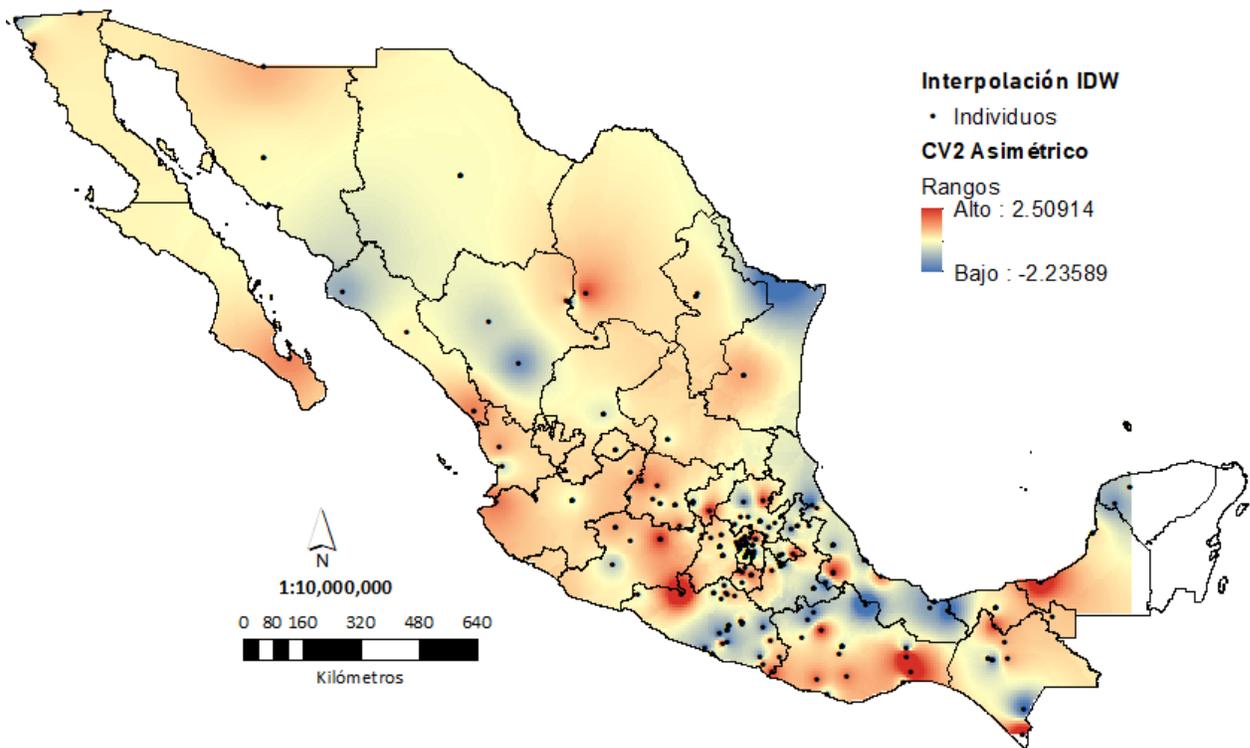
**Figura 37.** Mapa de interpolación IDW. Pondera los valores de CV3 simétrico, los rangos altos de la ponderación se marcan en rojo y los rangos bajos en azul.

En la forma asimétrica el CV1 los rangos altos (2.93856) están en el Norte de Baja California, en el punto donde colindan Sonora, Sinaloa y Chihuahua. Es en esta variación donde hay más concentración en estados de la región del Centro como el Estado de México, Morelos, Tlaxcala, Puebla, Guerrero; y algunos de Sureste como Oaxaca, Veracruz y Chiapas. Destaca que pocos estados presentan baja asimetría como Baja California Sur, Sonora y Michoacán. Figura 38.



**Figura 38.** Mapa de interpolación IDW. Pondera los valores de CV1 asimétrico, los rangos altos de la ponderación se marcan en rojo y los rangos bajos en azul.

En el CV2 asimétrico los valores altos (2.50914) están en todas las regiones del país de manera generalizada. También se destaca que pocos estados concentran baja asimetría como se observa en el mapa de la Figura 39.



**Figura 39.** Mapa de interpolación IDW. Pondera los valores de CV2 asimétrico, los rangos altos de la ponderación se marcan en rojo y los rangos bajos en azul

## Comparación entre grupos: DFA

### Componente simétrico de la forma

En la tabla 12 se agrupan los distintos porcentajes de clasificación de las regiones, que presentaron una discriminación alta: a) Centro 74% (n=897) vs Norte 74% (n=28). b) Centro 72% (n=870) vs Occidente 70% (n=37). c) Centro 72% (n=867) vs Sureste 68% (n=56). d) Norte 82% (n=31) vs Occidente 89% (n=47). e) Norte 82% (n=31) vs Sureste 82% (n=67). f) Occidente 79% (n=42) vs Sureste 83% (n=68). No obstante, en las pruebas de validación cruzada dichos porcentajes descienden, sólo algunos mantienen un porcentaje arriba de 70%: a) Centro 72% (n=869) vs Norte 74% (n=28). b) Centro 70% (n=851) vs Occidente 66% (n=35), c) Centro 70% (n=839) vs Sureste 30% (371).

**Tablas 12.** Porcentajes de DFA: matrices de porcentajes de clasificación ente regiones centro, norte, occidente y sureste. Componente simétrico. En amarillo los porcentajes altos.

a)

Centro-Norte Función Discriminante			
Región	Centro	Norte	Total
Centro	897 (74%)	313 (26%)	1210 (100%)
Norte	10 (26%)	28 (74%)	38 (100%)
Validación Cruzada			
Región	Centro	Norte	Total
Centro	869 (72%)	341 (28%)	1210 (100%)
Norte	28 (74%)	10 (26%)	38 (100%)

b)

Centro-Occidente Función Discriminante			
Región	Centro	Occidente	Total
Centro	870 (72%)	340 (28%)	1210 (100%)
Occidente	16 (30%)	37 (70%)	53 (100%)
Validación Cruzada			
Región	Centro	Occidente	Total
Centro	851 (70%)	359 (30%)	1210 (100%)
Occidente	35 (66%)	18 (34%)	53 (100%)

c)

Centro-Sureste Función Discriminante			
Región	Centro	Sureste	Total
Centro	867 (72%)	343 (28%)	1210 (100%)
Sureste	26 (32%)	56 (68%)	82 (100%)
Validación Cruzada			
Región	Centro	Sureste	Total
Centro	839 (70%)	371 (30%)	1210 (100%)
Sureste	47 (57%)	35 (43%)	82 (100%)

d)

Norte-Occidente Función Discriminante			
Región	Norte	Occidente	Total
Norte	31 (82%)	7 (18%)	38 (100%)
Occidente	6 (11%)	47 (89%)	53 (100%)
Validación Cruzada			
Región	Norte	Occidente	Total
Norte	16 (42%)	22 (58%)	38 (100%)
Occidente	26 (49%)	27 (51%)	53 (100%)

e)

Norte-Sureste Función Discriminante			
Región	Norte	Sureste	Total
Norte	31 (82%)	7 (18%)	38 (100%)
Sureste	15 (18%)	67 (82%)	82 (100%)
Validación Cruzada			
Región	Norte	Sureste	Total
Norte	18 (47%)	20 (53%)	38 (100%)
Sureste	30 (37%)	52 (63%)	82 (100%)

f)

Occidente-Sureste Función Discriminante			
Región	Occidente	Sureste	Total
Occidente	42 (79%)	11 (21%)	53 (100%)
Sureste	14 (17%)	68 (83%)	82 (100%)
Validación Cruzada			
Región	Occidente	Sureste	Total
Occidente	24 (45%)	29 (55%)	53 (100%)
Sureste	36 (44%)	46 (56%)	82 (100%)

### Componente asimétrico de la forma

En la tabla 13 se agrupan los porcentajes de clasificación con una discriminación alta:

a) Centro 75% (n=903) vs Norte 76% (n=29). b) Centro 70% (n=843) vs Occidente 66% (n=35). c) Centro 68% (n=825) vs Sureste 71% (n=58). d) Norte 87% (n=33) vs Occidente 85% (n=45). e) Norte 76% (n=29) vs Sureste 84% (n=69). f) Occidente 74% (n=39) vs Sureste 76% (n=62).

No obstante, en las pruebas de validación cruzada dichos porcentajes descienden, sólo algunos mantienen un porcentaje arriba de 70%: a) Centro 73% (n=885) vs Norte. b) Occidente 74% (n=39) vs Centro.

**Tabla 13.** Porcentajes de DFA: matrices de porcentajes de clasificación ente regiones Centro, Norte, Occidente y Sureste. Componente asimétrico. En amarillo porcentajes altos.

a)

Centro-Norte Función Discriminante			
Región	Centro	Norte	Total
Centro	903 (75%)	307 (25%)	1210 (100%)
Norte	9 (24%)	29 (76%)	38 (100%)
Validación Cruzada			
Región	Centro	Norte	Total
Centro	885 (73%)	325 (27%)	1210 (100%)
Norte	24 (63%)	14 (37%)	38 (100%)

b)

Centro-Occidente Función Discriminante			
Región	Centro	Occidente	Total
Centro	843 (70%)	367 (30%)	1210 (100%)
Occidente	18 (34%)	35 (66%)	53 (100%)
Validación Cruzada			
Región	Centro	Occidente	Total
Centro	826 (68%)	384 (32%)	1210 (100%)
Occidente	39 (74%)	14 (26%)	53 (100%)

c)

Centro-Sureste Función Discriminante			
Región	Centro	Sureste	Total
Centro	825 (68%)	385 (32%)	1210 (100%)
Sureste	24 (29%)	58 (71%)	82 (100%)
Validación Cruzada			
Región	Centro	Sureste	Total
Centro	796 (66%)	414 (34%)	1210 (100%)
Sureste	47 (57%)	35 (43%)	82 (100%)

d)

Norte-Occidente Función Discriminante			
Región	Norte	Occidente	Total
Norte	33 (87%)	5 (13%)	38 (100%)
Occidente	8 (15%)	45 (85%)	53 (100%)
Validación Cruzada			
Región	Norte	Occidente	Total
Norte	18 (47%)	20 (53%)	38 (100%)
Occidente	27 (51%)	26 (49%)	53 (100%)

e)

Norte-Sureste Función Discriminante			
Región	Norte	Sureste	Total
Norte	29 (76%)	9 (24%)	38 (100%)
Sureste	13 (16%)	69 (84%)	82 (100%)
Validación Cruzada			
Región	Norte	Sureste	Total
Norte	18 (47%)	20 (53%)	38 (100%)
Sureste	33 (40%)	49 (60%)	82 (100%)

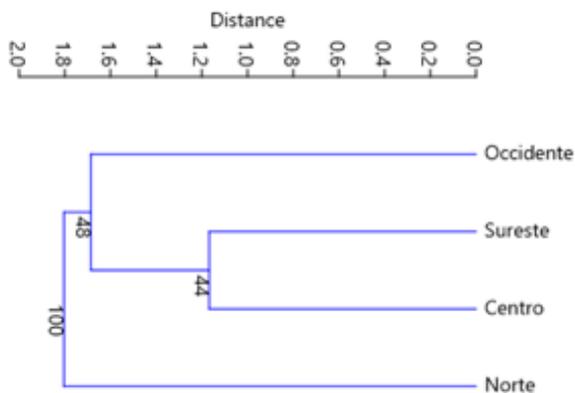
f)

Occidente-Sureste Función Discriminante			
Región	Occidente	Sureste	Total
Occidente	39 (74%)	14 (26%)	53 (100%)
Sureste	20 (24%)	62 (76%)	82 (100%)
Validación Cruzada			
Región	Occidente	Sureste	Total
Occidente	19 (36%)	34 (64%)	53 (100%)
Sureste	40 (49%)	42 (51%)	82 (100%)

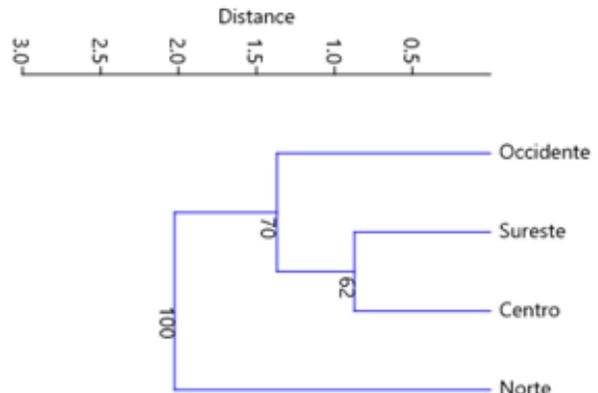
## Modelo de agrupación: Análisis de conglomerados

En el dendograma de la Figura 40a, del morfoespacio simétrico se observa una baja agrupación en términos del modelo general, presenta valores de 44-48% de clasificaciones correctas en las permutaciones realizadas. La distancia entre grupos fluctúa entre 1.2 y 1.8. Por otro lado, respecto del espacio asimétrico, el porcentaje de clasificaciones se elevó entre 62-70% con distancias de 0.8-1.5. ver Figura 40b. Las agrupaciones resultantes son concordantes entre espacios morfométricos agrupando con la mínima distancia a Sureste y Centro, teniendo como grupo hermano a Occidente y como grupo externo al Norte.

### a) Simétrica



### b) Asimétrica

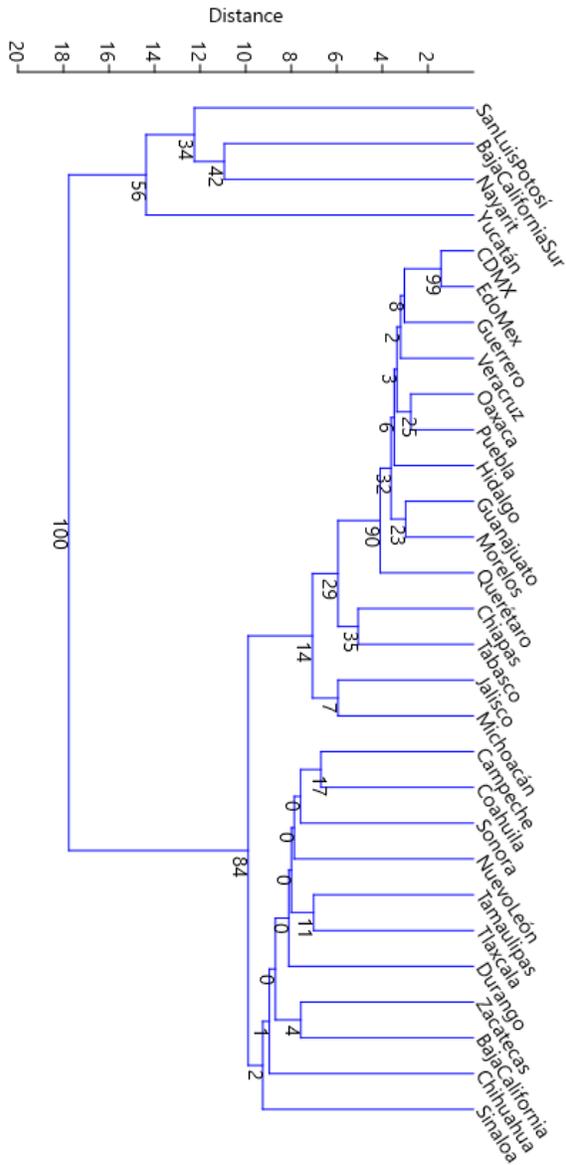


**Figura 40.** Agrupación jerárquica (UPGMA) por región geográfica con los datos CVA de la matriz de distancias Mahalanobis. Con un cómputo de 10,000 permutaciones. (a) Forma simétrica de la cara. (b) Forma asimétrica de la cara.

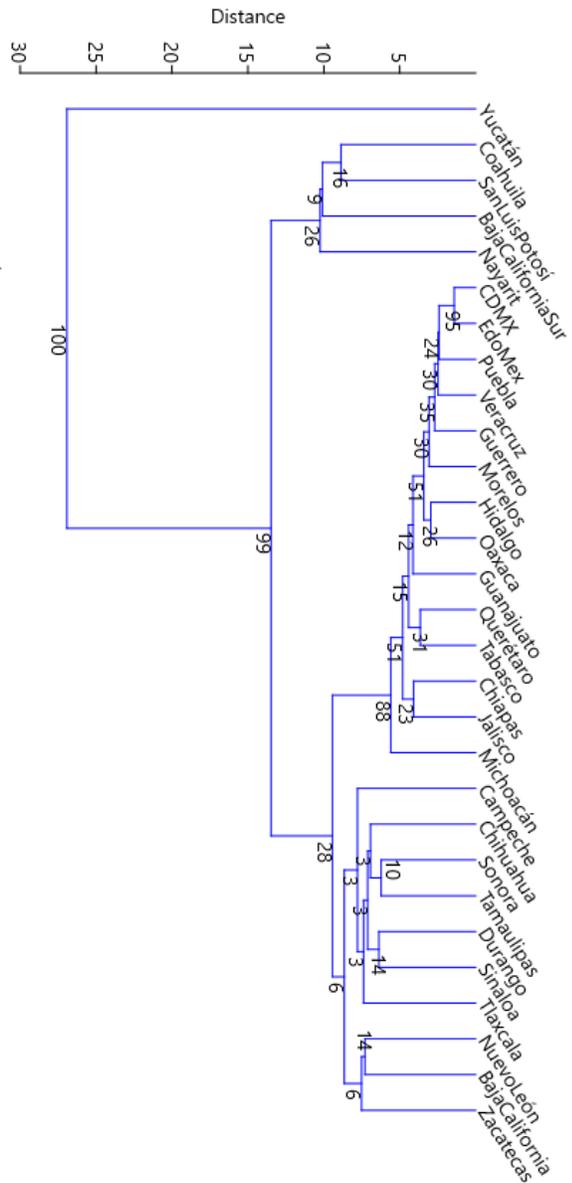
En el dendograma por lugar de nacimiento de la Figura 41a, del espacio de forma simétrica, se distinguen tres agrupaciones en términos del modelo general y presentan valores de 14-84% de clasificaciones correctas en las permutaciones realizadas. La distancia entre grupos fluctúa entre 7 y 14. La agrupación con la máxima distancia contiene estados de la región Norte (excepción Tlaxcala y Campeche). Y la agrupación con las mínimas distancias concentra tres subgrupos: Occidente de un lado, Sureste y Centro más cercanos. Del subgrupo del Centro destaca que el Estado de México y la Ciudad de México presentan una clasificación entre ellos de 99%. El tercer grupo de la rama externa congrega estados del Norte a excepción de Yucatán.

Por otro lado, en la Figura 41b del morfoespacio asimétrico, se generaron tres agrupaciones y una rama atípica con la entidad de Yucatán; con valores de 26-99% de clasificaciones correctas en las permutaciones. Las distancias entre grupos fluctuaron entre 10 y 14. La agrupación con la máxima distancia comprende el Norte como grupo externo. El grupo con la distancia media son también entidades de la región Norte (excepto Campeche y Tlaxcala). La agrupación con la distancia menor la componen el Occidente, Sureste y Centro. De esta última región, los estados de Ciudad de México y Estado de México presentan la clasificación entre ellos de 99%.

**a) Simétrica**



**b) Asimétrica**



**Figura 41.** Agrupación jerárquica (UPGMA) por lugar de nacimiento con los datos CVA de la matriz de distancias Mahalanobis. Con un cómputo de 10,000 permutaciones. **(a)** Forma simétrica de la cara. **(b)** Forma asimétrica de la cara.

Capítulo 6:  
DISCUSIÓN

## Error de medición

El error de medición es ubicuo y puede introducirse en cualquier fase de un análisis morfométrico. Es importante saber en qué fase se introduce una cantidad no despreciable de error y qué se puede hacer para limitar sus efectos. En nuestros resultados el error interobservador fue mayor que el intraobservador. Esto se ha documentado en análisis donde se recopilaron y combinaron datos de múltiples fuentes para determinar hasta qué punto el error intra e interobservador influyen en los resultados; y se halló mayor varianza a nivel interobservador (Robinson & Terhune, 2017). En otro estudio Fagertun et al. (2014) evaluaron un procedimiento de fenotipado manual de *landmarks* faciales, entre seis operadores. Analizaron la variabilidad intra e interobservador también utilizando un ANOVA, sus resultados mostraron que los puntos de referencia anatómicos del ojo se asociaron con la varianza más baja, mientras que los puntos de las cejas tienen la mayor variación; llegaron a la conclusión de que la variabilidad entre operadores se asoció principalmente con puntos de referencia particulares que eran más variables (Fagertun et al., 2014). Lo cual sucedió también con los resultados de la presente tesis, donde la mayor variabilidad interobservador se asoció en cejas, orejas, nasion y gnation; por lo que en este tipo de casos, realizar una estandarización de los datos a la media del observador más experimentado reduce este tipo de error.

La expectativa lógica de que la experiencia y el aprendizaje de los operadores tienen un efecto sobre los niveles de error de medición se documentó al comparar un operador novato con un experto (Osis et al., 2015). Sin embargo, el nivel de experiencia no es el único factor que afecta el error de medición entre operadores. También, la variación en la digitalización de los operadores se asocia a *landmarks* particulares que por sus características peculiares son difíciles de precisar, como fueron las cejas, (Campomanes-Álvarez et al., 2014; Fagertun et al., 2014), orejas, nasion y gnation. Para lo cual sería útil el consenso entre múltiples operadores sobre dónde colocar los *landmarks* después de que hayan digitalizado el mismo espécimen,

incluso la generación de referencias visuales por *landmark*, pero quizás la estandarización directa en la digitalización sea el elemento más importante, aunque no hay evidencias de ello.

Evaluar el error de medición permite al investigador tener una percepción de la solidez de un conjunto de datos y de los resultados inferenciales basados en él. Aunque la evaluación del error de medición puede generalmente considerarse un costo en términos de tiempo y recursos, esta práctica también puede ayudar a ahorrar tiempo y utilizar los recursos de una manera más productiva. Por ejemplo, cuando se tiene un estudio donde los niveles de error de medición son insignificantes en relación con el efecto biológico como es el caso de los datos que ya se tenían fenotipados y avalados como en la presente investigación (Quinto-Sánchez et al., 2015, 2018; Ruiz-Linares et al., 2014), se puede realizar el mismo estudio planificado tomando como referencia sus valores, completando así la investigación en menos tiempo o utilizando el tiempo y los recursos para aumentar el tamaño de la muestra como se hizo en este trabajo.

Sin embargo, es necesario aplicar protocolos de capacitación, entrenamiento y validación en la tarea de fenotipado. La implementación de estos requisitos previos es una vía sencilla para mejorar la precisión y generar un mínimo en la estimación de error interobservador (Chang & Alfaro, 2015). Dado que los conjuntos de datos morfogeométricos cada vez se comparten más entre investigadores de diferentes laboratorios o instituciones, a través de contactos privados o repositorios públicos. Y el error de medición interobservador, en estos casos, puede ser una fuente de variación sustancial cuando se combinan diferentes conjuntos de datos morfogeométricos y puedan tener un efecto, a veces, inesperado en las estimaciones de error. Sin embargo, no es recomendable tener una perspectiva de todo o nada sobre el error de medición. Pues en la presente tesis el error estuvo presente, pero al estandarizar los valores estos pudieron compararse. Y es importante tener en cuenta, que al aumentar el número muestral de la base de datos, el poder estadístico aumenta.

## Regresión multivariante de la forma

La predicción del tamaño sobre la forma resultó significativa pero los porcentajes fueron niveles muy bajos, es decir, que no representan un patrón de importancia para la forma tanto en el morfoespacio simétrico y asimétrico. Para validarlo y tener evidencia, se hizo un análisis libre de alometría para corroborar el efecto de este porcentaje, y los resultados mostraron un nulo cambio en la diferenciación de la variación. Según, Mitteroecker et al. (2013) en su estudio de alometría sobre la forma facial llegó a la conclusión de que el tamaño está relacionado de manera menos clara y no significativa con la forma facial en muestras de adultos de una misma población (Mitteroecker et al., 2013). En cambio, si se quisiera evaluar el tamaño de la cara en distintas poblaciones esto sí tuviera importancia ya que en algunas poblaciones la estatura es mayor que en otras y eso se correlaciona con el tamaño craneofacial.

En la presente tesis se optó por analizar ambos componentes de la forma, el simétrico y asimétrico, porque cuando se tiene en cuenta la simetría es posible mejorar las técnicas de reconocimiento facial de última generación (Claes et al., 2012). Y la asimetría facial informa sobre características del crecimiento y desarrollo. Por lo tanto, un estudio sobre la variación de la forma facial debe centrarse en los patrones de simetría y asimetría para una comprensión completa de la variación estructural (Claes et al., 2012). La importancia de la simetría bilateral crea la necesidad de estudiar los componentes de la forma facial simétrica y la asimétrica por separado, lo que se confirmó en los hallazgos, de la presente investigación, contrastantes pero complementarios entre ellos.

Cuando se analizó si la forma facial era un adecuado predictor del sexo se encontró un alto y significativo porcentaje de dimorfismo sexual para la forma simétrica y mucho menor porcentaje, aunque significativo para la forma asimétrica de la cara. Una investigación de dimorfismo sexual en la forma facial concluyó en una alta diferenciación, y al igual que nuestros resultados, ambos componentes no estaban

sus diferencias distribuidas por igual (V F Ferrario et al., 1993). En otros estudios realizados con morfometría geométrica y con ambos componentes simétrico y asimétrico, sus resultados mostraron diferencias significativas entre sexos (Agbolade et al., 2020; Hennessy et al., 2002, 2005; Samal et al., 2007). Al igual que la investigación de Claes et al. (2012) sobre la simetría facial él también detectó, al igual que nuestros resultados un grado sustancial de dimorfismo sexual.

El índice de masa corporal (IMC) es una medida que se utiliza para describir el peso de una persona en función de la relación entre su altura y su peso. En los estudios de identificación humana facial es importante conocer si existe alguna influencia en el reconocimiento facial cuando las formas faciales varían por cambios en el peso corporal. Esto se investigó con fotografías y los científicos encontraron que las grandes alteraciones del peso corporal pueden reducir significativamente la precisión de coincidencia del sistema de reconocimiento facial (Wen et al., 2014). En otro estudio se analizaron imágenes faciales de estudiantes universitarios para contrastar el IMC predicho con el recolectado físicamente. Fue eficaz para las categorías de IMC normal y con sobrepeso. Pero para las personas de bajo peso y obesidad la predicción fue menos precisa (Barr et al., 2018). Y en una metodología para la extracción automática de características relacionadas con los parámetros de peso, a partir de datos adquiridos con escáneres faciales 3D, mostraron que las medidas están altamente correlacionadas con el IMC y proporcionan un soporte en la detección del peso (Pascali et al., 2016). En esta investigación cuando se analizó la predicción del IMC sobre la forma facial, los resultados presentaron porcentajes altos y significativos para la cara simétrica y un mejor ajuste en la gráfica de regresión donde la mayor parte de los individuos se concentran en las clasificaciones de peso normal y sobrepeso, y para la clasificación de bajo peso y obesidad la cantidad de individuos es menor. Contrariamente, la forma asimétrica su predicción es menor; estos resultado concuerdan con los ya reportados, en un investigación donde el IMC no está asociado con valores de asimetría fluctuante (Quinto-Sánchez et al., 2015).

La edad es un buen predictor para la forma simétrica en comparación con la asimétrica. En un estudio observaron diferencias significativas entre la edad y la población (Agbolade et al., 2020). Esto también ha sido reportado en un estudio realizado con fotografías en 2D, donde se hallaron diferencias morfológicas entre los distintos grupos de edad y es más significativa la edad en el cambio de la variación de la cara en especial en el proceso de envejecimiento (Farrera et al., 2016); y en el componente asimétrico en estudios con modelos 3D (Quinto-Sánchez et al., 2015).

Con respecto a la heterocigosidad, el flujo de genes requiere tanto de la dispersión como el apareamiento exitoso. Según el modelo de Relethford-Blangero los niveles esperados de heterocigosidad son proporcionales a la variación fenotípica total en la población y, como tal, se pueden realizar estimaciones de parámetros como el flujo de genes y la deriva génica (J H Relethford & Blangero, 1990). En los resultados de la presente investigación, la heterocigosidad respecto del componente simétrico de forma presentó los porcentajes más bajos de las demás variables. Y en el componente asimétrico este parámetro no fue significativo. Por lo tanto, se tiene una población tendiente a la homogeneidad. Debido a que en la población el flujo de genes cambia las frecuencias de los alelos e introduce una nueva variación dentro de los demes y reduce las diferencias genéticas entre los demes (Templeton, 2019). Estos efectos son opuestos a la deriva genética, por lo que gran parte de la estructura de la población está determinada por el equilibrio del flujo de genes frente a la deriva genética. Las diferencias en las frecuencias de los alelos entre demes causan una deficiencia de heterocigotos con respecto a las expectativas de Hardy-Weinberg en la población total, incluso cuando la población local se aparee al azar o incluso evita la endogamia.

En cuanto a la ancestría, los seres humanos tienden a dispersarse en grupos de individuos relacionados, lo que puede aumentar en gran medida las diferencias en el acervo genético entre las poblaciones locales, como lo fue en las poblaciones amerindias precolombinas. Los porcentajes de ascendencia nativa amerindia en la

población mexicana, indican que la migración de otro continente no ha sido lo suficientemente extensa como para borrar la señal de la estructura de la población nativa en la región (Wang et al., 2008). Aunque, los españoles -principalmente de la Península Ibérica- (Adhikari et al., 2016) se trasladaron de grandes distancias en el periodo de la Conquista, entrado en contacto con dichas poblaciones locales. La mezcla en México ha involucrado predominantemente a hombres europeos y mujeres nativas y africanas (Wang et al., 2008). Al respecto se han realizado estudios donde se ha estimado la ascendencia para identificar segmentos del genoma pertenecientes a nativos amerindios y europeos, dada la baja proporción encontrada de ascendencia africana (Moreno-Estrada et al., 2014), cuyos resultados reflejaron la ascendencia genética subyacente de las poblaciones locales nativas amerindias y demostraron una fuerte relación entre la población indígena y la mestiza, aunque sin la deriva extrema que presentan algunos grupos indígenas actuales (Moreno-Estrada et al., 2014). Ahora bien, en los resultados de la presente tesis relacionados con las ancestrías genéticas se obtuvieron porcentajes predichos bajos tanto para la ancestría amerindia como la ancestría europea, en la forma simétrica; y en cambio un alto componente mestizo, el cual por la historia de la población se lleva fijando más de cinco siglos. En este sentido, el flujo de genes después de la mezcla ha estado restringido por la distancia geográfica (aislamiento por distancia) dentro del mismo territorio mexicano. Sin, embargo, los individuos no se encuentran en poblaciones distintas y discretas, por lo que es importante analizar a los individuos para ver si se agrupan en subpoblaciones (Templeton, 2019) y de tal manera encontrar una distribución fenotípica a lo largo del territorio.

En cambio, para la forma asimétrica los porcentajes de ancestrías no llegaron a ser significativas; lo cual no concuerda con investigaciones sobre inestabilidad del desarrollo, donde hallaron una correlación significativa entre ancestría amerindia y asimetría facial. Aunque, ese mismo estudio reveló que su magnitud de asimetría tiende a disminuir con el mestizaje. (Quinto-Sánchez et al., 2015). Entonces si esto

último es válido, se entiende que la forma asimétrica de nuestros resultados no es significativa en las ascendencias amerindias y europeas por ser una población mayoritariamente mestiza.

### Morfoespacios: PCA e integración morfológica

Se comprobó la existencia de diferencias morfológicas faciales entre individuos agrupados en cuatro regiones del país. Los análisis de los componentes de variación mostraron mayor alcance en la forma simétrica que en la asimétrica, por lo tanto, para estudios de identificación forense conviene enfocarse en la forma simétrica. Los individuos del grupo del Sureste presentaron la mayor variabilidad en el morfoespacio y los individuos de la región Centro presentaron la más baja variación; lo cual podría atribuirse a la baja heterocigosidad y mayor homogeneidad, puesto que el número muestral de la región del Centro es el más alto. Y la caracterización del cambio de la forma fue generalizado en los polígonos de cambio de forma, por lo que para fines de esta investigación fue conveniente centrarse en un análisis distinto, citado más adelante. Pues, además, en la prueba de integración morfológica se verificó que tanto los rasgos morfológicos se correlacionan con la región geográfica. Y el grupo de individuos de la región del Centro se encontró están más alejados del grupo del Sureste y en puntos intermedios están los de Occidente y el Norte; pero los intervalos de confianza no se ajustaron al modelo.

Por otro lado, en la forma asimétrica se observó una asimetría direccional en el tercio medio de la cara y fue notable que en el eje PC2 la mandíbula tuvo un desplazamiento en el eje positivo hacía la derecha y en el eje negativo hacia la izquierda. En otro análisis en busca de asimetría fluctuante Claes et al., (2012) encontraron un efecto fuerte de asimetría direccional en los hombres. El mentón fue fuertemente asimétrico, con un desplazamiento lateral de la mandíbula seguido de la correspondiente asimetría contralateral de la cara media (Claes et al., 2012). Sin embargo, en la presente tesis se evaluó asimetría por región geográfica, la cual

también presentó el mismo cambio en mandíbula, sería de interés para futuros estudios analizar la asimetría direccional relacionada con el dimorfismo sexual en la población mexicana, puesto que en la mayoría de las publicaciones han encontrado a la asimetría direccional facial como una constante (Barrett et al., 2012; Bigoni et al., 2013; Chovalopoulou et al., 2017; Ercan et al., 2008; Farrera et al., 2016; V F Ferrario et al., 1995; Virgilio F. Ferrario et al., 2001; Klingenberg, 2015; Lotto & González, 2014; Quinto-Sánchez et al., 2015, 2017; Shaner et al., 2001; Van Dongen, 2014; Weisensee, 2013). Y en los análisis de integración, el rango del intervalo de confianza si se ajusta y prueba que los individuos del Centro y el Sureste son más cercanos, en cambio los de Occidente y Norte se extrapolan.

### Variación entre grupos: CVA

En las investigaciones con morfometría geométrica basta sólo hacer estudios de PCA, puesto que muchas veces en biología los análisis de la forma se realizan para hallar diferencias entre especies, lo que da como resultado una clara visualización de la variación en el morfoespacio y su separación entre ellas. Sin embargo, cuando se analizan subgrupos de una misma población es necesario realizar arreglos matemáticos diferentes que describan mejor las diferencias morfológicas dentro de la misma población. En la antropología forense esto ha sido una constante en las publicaciones que aplican la metodología de morfometría geométrica en la identificación craneofacial humana con base en modelos de biodistancia (Calle, 2015; Farrera et al., 2016; Humphries et al., 2015; Ross et al., 1999; K. Spradley, 2016; M. K. Spradley, 2014; Tise et al., 2014; Urbanová & Ross, 2016). En una investigación, un grupo de antropólogos biológicos con los datos morfológicos de una muestra de 339 cráneos utilizaron los resultados de las distancias Mahalanobis generadas a partir del CVA, para estimar con mayor precisión el origen geográfico de dichos restos encontrados en la frontera entre México y Estados Unidos. Sus hallazgos sugieren que los migrantes de Texas, que son más propensos a incluir personas de países distintos a México, pueden distinguirse morfológicamente de la población mexicana y de la

población maya de Guatemala. (M. K. Spradley, 2014). En otro estudio se exploró la variación craneofacial entre poblaciones mexicanas, guatemaltecas, puertorriqueñas, cubanas y estadounidenses. Se basaron en CVA y sus distancias Mahalanobis, donde encontraron que las poblaciones de México y Guatemala son más similares; y los individuos de Puerto Rico y Cuba son más parecidos entre sí (Tise et al., 2014). Lo cual esboza, que en las diferencias morfológicas entre poblaciones existe una distribución espacial, es decir una variación donde los fenotipos se asemejan en medida de trayectorias geográficas cortas. En otros análisis craneofaciales ya no entre poblaciones, sino con grupos de tres regiones de México (Centro, Sureste y Oeste) encontraron diferencias significativas tanto en tamaño como forma. Y en sus resultados de CVA y distancias Mahalanobis mostraron a todos los grupos significativamente diferentes, sin embargo, los individuos de Mérida y Chichen Itzá son parecidas y también los de Chihuahua con Mérida (Humphries et al., 2015). Dichos resultados no siguen un patrón geográfico, y según ellos, afirman la población de México es heterogénea pues hubo diferencia entre los tres grupos, sin embargo, hay que tomar con precaución sus conclusiones puesto su muestra fue de 318 cráneos. Y además de diferentes temporalidades, con lo cual explicaría la heterogeneidad.

En las investigaciones forenses citadas la experimentación se hizo con cráneos, en ninguna se trabajó con tejido blando de la cara. Por lo tanto, hay que tomar con cautela la comparación de dichas investigaciones craneofaciales con nuestros resultados de tejido blando facial. Pues se ha demostrado que el crecimiento de los tejidos blandos es en gran medida independiente del crecimiento esquelético (Premkumar, 2011). Y en una prueba realizada para saber qué tanta covariación existe entre tejido esquelético y tejido blando en cráneo, un grupo de científicos halló que la relación entre el perfil facial esquelético y el tejido blando de la cara media presentan una covariación insignificante y un poder predictivo débil. El tercio superior e inferior de la cara mostraron la mayor covariación de forma de hueso y tejido blando. Aunque, la forma de los tejidos blandos no siguió las estructuras óseas como se esperaba

(Zedníková Malá et al., 2018). Sin embargo, son investigaciones que partieron de un objetivo común y siguieron la misma metodología, que la presente tesis para hallar las diferenciaciones entre los distintos grupos poblacionales y su aplicación en el uso forense. Por lo tanto, en la presente investigación se tomaron como referencia; en nuestros resultados se encontraron diferencias faciales significativas entre el grupo de la región Centro con los grupos de individuos del Sureste y de Occidente; sin embargo, el grupo del Norte no fue diferente, que si se sigue la teoría de la distancia geográfica este grupo debiera ser significativamente distinto, pero no lo fue. En cambio, en la forma asimétrica facial la región Norte fue el único grupo que presentó diferencia significativa del grupo del Centro. Con lo cual es posible tomar la base de datos como referencia en la búsqueda de una clasificación. Dado que los estudios de biodistancia que involucran a grupos recientes pueden informar a la práctica antropológica forense una mejor comprensión de las muestras de referencia utilizadas y comprender la relación de un individuo desconocido con grupos de referencia conocidos (Ousley et al., 2009; M. K. Spradley, 2014); aunque con cautela con respecto del grupo del Norte.

### Índice de Moran y Ponderación geoespacial IDW

Se hizo un análisis para encontrar posibles patrones de variación morfológica dependiendo de la región geográfica. Esto se logró con la herramienta de autocorrelación geoespacial de ArcGis, cuyos resultados mostraron patrones morfológicos faciales de distribución; es decir los CV1, CV2, CV3 responden a procesos donde existe un patrón diferencial con respecto a características afines. Por lo tanto, la presente base de datos puede proporcionar una estimación del origen geográfico de un individuo desconocido, puesto que la información aquí presentada pertenece a una población dividida en subgrupos regionales de referencia, y en este caso, podría reducirse el margen de búsqueda. En este contexto, se visualizaron los patrones de agrupación distribuidos en el mapa con el método IDW, el cual predice en un ráster los rangos altos de la variación facial por región geográfica. El ráster predijo valores altos del CV1 en los estados colindantes con el Golfo de México y

estados de las costas del Océano Pacífico. El ráster de CV2 se presentó en las regiones Norte, Occidente y Sureste. Pero no es representativo en la región Centro. Y en el ráster CV3 los rangos más altos fueron para las regiones Norte, Centro y Sureste; y no en Occidente. Si bien cada componente de variación canónica muestra una caracterización de la forma facial, no se podría determinar un patrón particular por zona geográfica ya que en el mapa se distinguen rasgos generalizados de variación facial distribuidos en todo el territorio nacional. Aunque en la predicción de los ráster sea notorio observar en algunas entidades federativas rangos más altos de representatividad de dicha variación facial. Esto puede proporcionar una estimación del origen geográfico de un individuo desconocido, pues se parte del supuesto que el individuo pertenece a uno de los grupos de referencia. Por lo tanto, contar con una base de datos con grupos de referencia apropiados y comprender de dónde provienen esos grupos de referencia y cómo se relacionan biológicamente entre sí, es la clave para una buena identificación. Ya que una estimación del origen geográfico, saber de dónde es la persona, se produce para su uso posterior dentro de una comunidad forense o medicolegal, por lo que la precisión en dichas estimaciones es importante (K. Spradley, 2016). Si un individuo es similar con respecto de un grupo, la agrupación puede ser la opción adecuada dada la naturaleza de la indagación. Si se desea una estimación de un individuo a nivel poblacional o un grado más fino subpoblacional, la agrupación por regiones puede ser apropiada al predecir si un individuo pertenece a un área geográfica y período temporal reciente.

Por otra parte, la predicción de los ráster para la forma asimétrica facial sólo fue significativa para los CV1 y CV2, el patrón se presentó de manera general en todas las regiones del país. Destaca que la variación del cambio de la cara fue una asimetría direccional en nariz y mandíbula. Lo cual, ya ha sido reconocido como un fenómeno real y generalizado en todos los seres humanos que parecen superficialmente simétricos pero muestran una sutil asimetría direccional estadísticamente significativa (Barrett et al., 2012; Bigoni et al., 2013; Chovalopoulou et al., 2017; Ercan et al.,

2008; Farrera et al., 2016; V F Ferrario et al., 1995; Virgilio F. Ferrario et al., 2001; Klingenberg, 2015; Lotto & González, 2014; Shaner et al., 2001; Van Dongen, 2014; Weisensee, 2013). También reportado en investigaciones que buscan asimetría fluctuante como indicadora de inestabilidad del desarrollo en poblaciones latinoamericanas y donde se encontró asimetría direccional en los mestizos como la expresión más fuerte en su muestra (Quinto-Sánchez et al., 2015, 2017). En toda la distribución de la predicción de los rasters hay que tener en cuenta, que los lugares de nacimiento de los individuos son de zonas con alta densidad poblacional de acuerdo con los censos de población. Por ende, los individuos se encuentran en zonas geográficas conurbadas, en capitales con creciente urbanización producida en las últimas generaciones. Finalmente, es importante tener en cuenta que dicha caracterización de la morfología facial en ningún momento intenta determinar tipologías, si no que buscan describir e inferir rasgos de variación morfológica facial biogeográfica dentro de una misma población.

En los análisis de ponderación las ancestrías genéticas amerindia y europea mostraron patrones morfológicos faciales de distribución con características afines en el territorio. Los rasters IDW predijeron rangos altos de la variación morfológica facial para la ancestría europea en la región Norte y Occidente del país. Se observó mayor concentración de ancestría europea cerca de la frontera en Baja California y Sonora. Cuyos resultados concuerdan con publicaciones que reportan alta concentración ancestral europea en las regiones del Norte (Humphries et al., 2015; Ruiz-Linares et al., 2014; Silva-Zolezzi et al., 2009). Es interesante observar en el mapa que la zona de la península de Yucatán presentó rangos altos de ancestría europea, lo cual se relacione con el fenómeno de la Conquista, donde del primer encuentro con los españoles se dio entre los mayas en tierras yucatecas en 1517 y que con esto la península se convirtió como punto geográfico de arribo para los hispanos (Ojeda, 2019). Sin embargo, la mayor parte de estudios genéticos demuestran que los individuos mestizos de Yucatán son el único grupo con un linaje distintivo maya,

además de estar geográficamente distantes de otros grupos, con fuertes diferencias culturales, sociales e históricas en comparación con los demás amerindios (Silva-Zolezzi et al., 2009). Por lo tanto, el ráster que predice ascendencia europea en la península de Yucatán sea por migraciones recientes de individuos con ancestría europea.

En contraste, los rasters IDW predijeron rangos altos de la variación morfológica facial para la ancestría amerindia mayoritariamente en las regiones del Centro y Sureste y en el Norte en los estados de Sinaloa, Zacatecas y Durango. Lo cual ya ha sido identificado en estudios genéticos donde la ascendencia amerindia en el Centro y Sureste de México fue la mayor en Latinoamérica (Ruiz-Linares et al., 2014; Salazar-Flores et al., 2015). Y análisis basados en SNP de alta densidad han revelado, que en México la ancestría nativa amerindia en los individuos del Sureste del país está predominantemente relacionado con los mayas, mientras que en los individuos del centro de México se relaciona más estrechamente con los nahuas (Adhikari et al., 2016; Moreno-Estrada et al., 2014). Y una búsqueda de firmas de selección, centrándose en las partes de los genomas derivadas de una población ancestral, identificaron regiones en las que una variante genética puede haber sido favorecida por la selección natural en esa población ancestral, describieron que para la Ciudad de México las proporciones medias de ascendencia es de 65% amerindia, 31% europea y 3% africana (Johnson et al., 2011). Y también estudios craneofaciales indican que los grupos mexicanos precolombinos y contemporáneos son más similares entre sí, lo que indica la preservación de un alto componente indígena (Hughes et al., 2013; Humphries et al., 2015). Los esclavos africanos fueron traídos a la región después de una notable reducción de la población amerindia, debido a las epidemias, entre 1545 y 1548 (Silva-Zolezzi et al., 2009; Wang et al., 2008).

Si se interpreta desde un enfoque etnohistórico la ascendencia amerindia es más elevada en las zonas que fueron densamente pobladas por los habitantes del México antiguo antes de la Conquista, ya que los datos genéticos han demostrado que

el componente amerindio de los mexicanos está estrechamente relacionado con los nativos precolombinos (Adhikari et al., 2016). Esa distribución aún perdura hasta nuestros días; aunque ahora predomina mayoritariamente un alto porcentaje de mestizaje. Se ha comprobado con morfometría geométrica que la mezcla entre europeos y nativos precolombinos en México produjeron cambios exclusivos en el patrón de forma craneofacial de estos grupos mezclados (Martínez-Abadías et al., 2006). Y se ha reportado, que la ascendencia genética tiene un impacto significativo de la variación fenotípica observada, no solamente en los mexicanos sino en las distintas poblaciones de Latinoamérica, que contienen loci genéticos con frecuencias alélicas diferenciadas entre africanos, europeos y amerindios. La ascendencia africana es generalmente baja en todo México, excepto en algunas regiones costeras (Ruiz-Linares et al., 2014) aunque en la presente investigación no se tomaron datos de ancestría africana.

Actualmente, en el campo de la antropología forense existe un debate con respecto de eliminar las estimaciones de ancestría por caer en algunos casos en descripciones de estereotipos, basados en prejuicios y tipologías raciales morfoscópicas que carecen de pruebas de heredabilidad y no establecen el trasfondo evolutivo y biogeográfico poblacional (Bethard & DiGangi, 2020). Sin embargo, existe la necesidad de utilizar áreas geográficas en lugar de agrupar a las poblaciones latinoamericanas en el término ambiguo de “hispano” en el trabajo de casos forenses para evaluar el lugar de origen o ascendencia (Urbanová & Ross, 2016). Por ejemplo, en los casos forenses de Estados Unidos usan el término “hispano” para describir un perfil biológico (M. K. Spradley, 2014). Lo que resulta de poca utilidad ya que los individuos de Latinoamérica no se refieren a sí mismos como “hispanos”. El término hispano es un constructo sociopolítico que ignora la etnohistoria y la variación biológica de las distintas poblaciones latinoamericanas que llevan mezcla genética nativa amerindia, europea, asiática y africana. Las migraciones históricas como la colonización europea de Latinoamérica llevaron a la mezcla genética, a la

reproducción entre individuos de poblaciones previamente aisladas con extranjeras. Lo que influyó mucho en la morfología facial de todas las poblaciones latinoamericanas con una mezcla genética altamente predictiva de la apariencia física (Hellenthal et al., 2014; Richmond et al., 2018; Ruiz-Linares et al., 2014). Por esta razón, los marcadores ancestrales a menudo se incluyen en los modelos de predicción facial, puesto que la ascendencia y el fenotipo están muy relacionadas (Richmond et al., 2018). A menudo es posible inferir la ascendencia reciente de un individuo basándose en características físicas observables como la estructura facial. De hecho, estudios previos han demostrado que la ascendencia auto percibida e inferida genéticamente está asociada con la morfología facial (Claes et al., 2014; Ruiz-Linares et al., 2014). Las diferencias morfológicas faciales relacionadas con la ascendencia están bien caracterizadas cuando se comparan individuos de distintas poblaciones, y esas diferencias distintivas permanecen incluso dentro de poblaciones más ancestralmente homogéneas (Richmond et al., 2018).

Los diferentes países que componen Latinoamérica tienen historias propias que generaron diferentes estructuras poblacionales y geográficas con una amplia diversidad morfológica. Por lo tanto, es importante comprender el papel que los métodos de estimación de ascendencia desempeñan en la sociedad. Para la antropología forense la estimación de la ancestría forma parte del perfil biológico y participa en la identificación de un individuo. Cada parámetro adicional que los antropólogos forenses puedan estimar ayuda a reducir aún más el margen de búsqueda para su comparación en los casos de personas desaparecidas y acercar un paso más en una identificación concluyente. Asimismo, es primordial que los estudios relacionados con la identificación forense tienen que estar enfocados en comprender y considerar la variación humana como continua y generalizada. Esto se lleva a cabo mediante el establecimiento de un conjunto de datos de referencia amplio y diverso para capturar la variación dentro y entre poblaciones, como es el objetivo de la presente investigación. El buscar la creación de variaciones continuas, elimina la

noción de rasgos discretos (Hefner & Spradley, 2018); y proporciona marcos estadísticos que proporcionan confiabilidad y validez para el método.

## Comparación entre grupos DFA y Análisis de conglomerados

Los análisis de función discriminante (DFA) arrojan estadísticas de clasificación que pueden proporcionar una estimación del origen geográfico de un individuo desconocido. Partiendo del supuesto de que el individuo desconocido potencialmente pueda pertenecer a uno de los grupos de referencia. En los resultados DFA tanto en la forma simétrica como asimétrica facial sólo los individuos de la región Centro presentaron un porcentaje de 70% de discriminación de las regiones Norte, Occidente y Sureste. Si bien confiar en un porcentaje de 70% de validación sobre la pertenencia a un grupo es un bajo porcentaje predictivo en una identificación. Hay que tomarlo como un criterio que demuestra un aspecto diferenciado y puede delimitar más el espectro de búsqueda de una persona desconocida. Por lo tanto, esta es una muestra con grupos de referencia que representan individuos de una población divididos por regiones geográficas y que la subpoblación del Centro comparte similitudes faciales entre sí y se diferencian de las tres regiones.

Según la teoría evolutiva, la mayoría de las variaciones en la forma craneofacial entre los humanos recientes reflejan simplemente los efectos de la deriva genética aleatoria, el flujo de genes y otros cambios evolutivos no seleccionados (Roseman & Weaver, 2007). Lo que se observa aquí es una variación morfológica facial dependiente del flujo genético entre individuos de las regiones más cercanas, o sea el grupo de la región Centro que fue sólo el que se diferenció. En otros análisis utilizando cráneos, encontraron que grupos del Centro, Sureste y Oeste, en las clasificaciones DFA la diferenciación fue de 95% en las validaciones cruzadas (Humphries et al., 2015), aunque su número muestral fue escaso y los cráneos pertenecían a diferentes temporalidades.

Uno de los propósitos de esta investigación fue conocer a través de análisis de biodistancia cómo se distribuye la variación morfológico facial en las distintas regiones del país, si es posible distinguir que un individuo sea de la región Norte y no del Centro; o de cualquier otra región. Es importante establecer si los individuos dentro de estos cuatro grupos regionales pueden distinguirse entre sí y tomarlos como base de referencia con el fin de mejorar el proceso de identificación. Ya que generalmente, los antropólogos forenses son llamados a estimar el origen geográfico de individuos no identificados (K. Spradley, 2016). El análisis de biodistancia se usa para comprender las relaciones biológicas de los individuos entre grupos de referencia poblacionales y los cuales comúnmente son utilizados en la práctica de la antropología forense para hallar coincidencias. Por lo tanto, se hicieron análisis de conglomerados con el lugar de nacimiento conocido de los individuos, dividiéndolos en cuatro regiones geográficas. Tanto en la forma facial simétrica como asimétrica, destacó que la región Norte es la rama con la mayor distancia y es un grupo externo de las demás regiones. Y el otro grupo contiene tres subgrupos que son las regiones Occidente, Sureste y Centro. Las regiones del Sureste y Centro son las que presentan las distancias más cercanas entre sí. Por lo que se infiere un flujo migratorio constante entre individuos con las menores distancias geográficas. Debido a que las poblaciones geográficamente próximas tienden a ser biológicamente similares. Y según (J. H. Relethford, 2016) existe una correlación espacial entre el flujo génico y los grupos locales, dada la tendencia de que su migración está limitada en función de la distancia geográfica. Y también que dentro de la región Centro existe una clasificación arriba de 95%. Esto puede interpretarse bajo la perspectiva de un modelo de aislamiento por distancia, donde los individuos de la Ciudad de México y Estado de México tienen porcentajes potenciales de similitudes fenotípicas y por ende genéticas; los cuales pueden ser tomadas como modelo para inferir la ancestría y/o origen de un individuo no identificado (ancestría biogeográfica). La causa de esta similitud es una región con individuos con mezcla de ancestrías amerindia y europea, con un flujo de genes condicionado por las distancias más cercanas y que genera una migración centralizada

por estar ahí concentrados las principales lugares políticos y económicos, a pesar del territorio extenso del país. Probablemente, influenciados por las relaciones culturales y políticas gestadas por un pasado histórico desde antes de la Conquista y después de ella, hasta tiempos contemporáneos.

Es importante señalar, que dichos resultados instan a que se debe ampliar la base de datos de referencia para aumentar el potencial en la precisión y alcanzar un porcentaje de mayor fiabilidad en una clasificación de las regiones del Occidente, Sureste y Norte; puesto que en los resultados se vislumbra una diferenciación entre las regiones, pero los porcentajes son limítrofes y no significativos en muchos casos. Dado que dentro de los objetivos es estimar de dónde es un individuo. Y comparar a un individuo desconocido con grupos más específicos, geográficamente definidos, será más informativo en un caso forense.

Capítulo 7:  
CONCLUSIONES

- Con la creación de la base de datos con modelos faciales de referencia 3D, de la población mexicana, fue posible caracterizar la variabilidad de la forma facial simétrica y asimétrica por regiones geográficas.
- El sexo, la edad, IMC y heterocigosidad son buenos predictores de la forma facial simétrica.
- La predicción de las ancestrías genéticas amerindia y europea, son significativas para la forma simétrica y predomina un alto componente mestizo.
- Los Índices de Moran mostraron patrones diferenciales de distribución con respecto a características afines en los CV1, CV2, CV3. Sin embargo, en la ponderación IDW, los ráster de distribución no conforma un patrón por zona geográfica, pues en el mapa se distinguen rasgos generalizados de variación morfológica distribuidos en todo el territorio.
- Los ráster para la forma asimétrica fue significativa para los CV1 y CV2; la característica de asimetría direccional se presentó de manera general en todas las regiones del país.
- Los Índices de Moran para la ancestría genética europea mostró patrones morfológicos faciales de distribución con características afines en el territorio. Los rasters IDW predijeron rangos altos de la variación morfológica para la ancestría europea en la región Norte, Occidente y la península de Yucatán.
- Los Índices de Moran para la ancestría genética amerindia mostró patrones morfológicos faciales de distribución con características afines en el territorio. Los rasters IDW predijeron rangos altos de la variación morfológica facial para la ancestría amerindia mayoritariamente en las regiones del Centro, Sureste; y en algunos estados del Norte.
- En los análisis de biodistancias para ambas simetrías, en términos de un patrón biogeográfico, las agrupaciones con la mínima distancia fueron Sureste y Centro, ellos tienen como grupo hermano a Occidente y como grupo externo el Norte. Del grupo del Centro destaca, que el Estado de México y la Ciudad de México presentan una clasificación entre ellos arriba de 95%.

- Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula de esta investigación, puesto que en las diferencias morfológico-faciales existe una distribución donde los fenotipos se asemejan en medida de trayectorias geográficas cortas.
- Aunque, es necesario ampliar la base de datos con modelos faciales de referencia 3D para aumentar el potencial en la precisión y alcanzar un porcentaje mayor de fiabilidad en una clasificación de DFA en las regiones del Occidente, Sureste y Norte; puesto que en los resultados se vislumbra una diferenciación entre las regiones, pero los porcentajes son limítrofes y no significativos en muchos casos. Dado que comparar a un individuo desconocido con grupos geográficamente definidos, será más informativo en un caso forense.

Capítulo 8:  
BIBLIOGRAFÍA

- Abate, A. F., Nappi, M., Riccio, D., & Sabatino, G. (2007). 2D and 3D face recognition: A survey. *Pattern Recognition Letters*, 28(14), 1885–1906. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2006.12.018>
- Ackermann, R. R., Rogers, J., & Cheverud, J. M. (2006). Identifying the morphological signatures of hybridization in primate and human evolution. *Journal of Human Evolution*, 51(6), 632–645. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2006.07.009>
- Adams, D. C., Rohlf, F. J., & Slice, D. E. (2013). A field comes of age: Geometric morphometrics in the 21st century. *Hystrix*, 24(1), 7–14. <https://doi.org/10.4404/hystrix-24.1-6283>
- Adhikari, K., Mendoza-Revilla, J., Chacón-Duque, J. C., Fuentes-Guajardo, M., & Ruiz-Linares, A. (2016). Admixture in Latin America. In *Current Opinion in Genetics and Development* (Vol. 41, pp. 106–114). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.gde.2016.09.003>
- Agbolade, O., Nazri, A., Yaakob, R., Ghani, A. A., & Cheah, Y. K. (2020). Morphometric approach to 3D soft-tissue craniofacial analysis and classification of ethnicity, sex, and age. *PLoS ONE*, 15(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228402>
- AGIB. (2019). *Arbeitsgruppe Identifikation nach Bildern*. Institut Für Humangenetik Und Anthropologie Universitätsklinikum. <http://bildidentifikation.de/standardsengl.html>
- Agnew, J. A., Livingstone, D. N., & Rogers, A. (1996). *Human geography: an essential anthology*.
- AlJulaih, G. H., Sharma, P., & Lasrado, S. (2020). Anatomy, Head and Neck, Nose Bones. In *StatPearls*. StatPearls Publishing.
- 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.
- Barr, M., Guo, G., Colby, S., & Olfert, M. (2018). Detecting Body Mass Index from a Facial Photograph in Lifestyle Intervention. *Technologies*, 6(3), 83. <https://doi.org/10.3390/technologies6030083>
- Barrett, C. K., Guatelli-Steinberg, D., & Sciulli, P. W. (2012). Revisiting dental fluctuating asymmetry in neandertals and modern humans. *American Journal of Physical Anthropology*, 149(2), 193–204. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22107>
- Bastir, M., Rosas, A., & Sheets, H. D. (2005). The Morphological Integration of the Hominoid Skull: A Partial Least Squares and PC Analysis with Implications for European Middle Pleistocene Mandibular Variation. *Modern Morphometrics in*

*Physical Anthropology*, 265–284. [https://doi.org/10.1007/0-387-27614-9\\_12](https://doi.org/10.1007/0-387-27614-9_12)

- Benítez, H. A., & Püschel, T. A. (2014). Modelando la varianza de la forma: Morfometría geométrica aplicaciones en biología evolutiva. *International Journal of Morphology*, 32(3), 998–1008. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022014000300041>
- Bertillon, A. (1890). *La photographie judiciaire: avec un appendice sur la classification et l'identification anthropométriques, 1853-1914* (Gauthier-Villars et fils (ed.)).
- Bethard, J. D., & DiGangi, E. A. (2020). Letter to the Editor—Moving Beyond a Lost Cause: Forensic Anthropology and Ancestry Estimates in the United States. In *Journal of Forensic Sciences* (Vol. 65, Issue 5, pp. 1791–1792). Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14513>
- Betti, L., Balloux, F., Hanihara, T., & Manica, A. (2010). The relative role of drift and selection in shaping the human skull. *American Journal of Physical Anthropology*, 141(1), 76–82. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21115>
- Bigoni, L., Krajíček, V., Sládek, V., Velemínský, P., & Velemínská, J. (2013). Skull shape asymmetry and the socioeconomic structure of an early medieval central european society. In *American Journal of Physical Anthropology* (Vol. 150, Issue 3, pp. 349–364). Am J Phys Anthropol. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22210>
- Biwasaka, H., Tokuta, T., Sasaki, Y., Sato, K., Takagi, T., Tanijiri, T., Miyasaka, S., Takamiya, M., & Aoki, Y. (2010). Application of computerised correction method for optical distortion of two-dimensional facial image in superimposition between three-dimensional and two-dimensional facial images. *Forensic Science International*, 197(1–3), 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.12.063>
- Bookstein, F. L. (1991). *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. Cambridge University Press.
- Buikstra, J. E., Frankenberg, S. R., & Konigsberg, L. W. (1990). Skeletal biological distance studies in American physical anthropology: recent trends. *American Journal of Physical Anthropology*, 82(1), 1–7. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330820102>
- Calle, S. C.; Sea, D. T. K. S. (2015). A Geometric Morphometric Analysis of Contemporary Hispanic Populations from Mexico and Colombia. *Boston University School of Medicine*, 3(1), 2015.
- Campbell, R. C., Sokal, R. R., & Rohlf, F. J. (1970). Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 133(1), 102. <https://doi.org/10.2307/2343822>
- Campomanes-Álvarez, B. R., Ibáñez, O., Navarro, F., Alemán, I., Cerdón, O., &

- Damas, S. (2014). Dispersion assessment in the location of facial landmarks on photographs. *International Journal of Legal Medicine*, 129(1), 227–236. <https://doi.org/10.1007/s00414-014-1002-4>
- Cattaneo, C. (2007). Forensic anthropology: developments of a classical discipline in the new millennium. *Forensic Science International*, 165(2–3), 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2006.05.018>
- Chan, E. K. F., Timmermann, A., Baldi, B. F., Moore, A. E., Lyons, R. J., Lee, S. S., Kalsbeek, A. M. F., Petersen, D. C., Rautenbach, H., Förtsch, H. E. A., Bornman, M. S. R., & Hayes, V. M. (2019). Human origins in a southern African palaeowetland and first migrations. *Nature*, 575(7781), 185–189. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1714-1>
- Chang, J., & Alfaro, M. (2015). Crowdsourced geometric morphometrics enable rapid large-scale collection and analysis of phenotypic data. *BioRxiv*, 023382. <https://doi.org/10.1101/023382>
- Chiari, Y., Wang, B., Rushmeier, H., & Caccione, A. (2008). Using digital images to reconstruct three-dimensional biological forms: A new tool for morphological studies. *Biological Journal of the Linnean Society*, 95(2), 425–436. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2008.01055.x>
- Chovalopoulou, M. E., Papageorgopoulou, C., & Bertatos, A. (2017). Cranium asymmetry in a modern Greek population sample of known age and sex. *International Journal of Legal Medicine*, 131(3), 803–812. <https://doi.org/10.1007/s00414-016-1430-4>
- Claes, P., Liberton, D. K., Daniels, K., Rosana, K. M., Quillen, E. E., Pearson, L. N., McEvoy, B., Bauchet, M., Zaidi, A. A., Yao, W., Tang, H., Barsh, G. S., Absher, D. M., Puts, D. A., Rocha, J., Beleza, S., Pereira, R. W., Baynam, G., Suetens, P., ... Shriver, M. D. (2014). Modeling 3D Facial Shape from DNA. *PLoS Genetics*, 10(3), e1004224. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1004224>
- Claes, P., Walters, M., Shriver, M. D., Puts, D., Gibson, G., Clement, J., Baynam, G., Verbeke, G., Vandermeulen, D., & Suetens, P. (2012). Sexual dimorphism in multiple aspects of 3D facial symmetry and asymmetry defined by spatially dense geometric morphometrics. *Journal of Anatomy*, 221(2), 97–114. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2012.01528.x>
- Clínica S&O. (2020). *Ortodoncia: Tipos de perfiles faciales*. [https://www.clinicasyo.com/web\\_orthodontic/ortodoncia\\_perfiles\\_faciales.html](https://www.clinicasyo.com/web_orthodontic/ortodoncia_perfiles_faciales.html)
- Collins, F. S. (2020). *Single Nucleotide Polymorphisms (SNPs)*. National Human Genome Research Institute, NHGRI.
- Cummaudo, M., Guerzoni, M., Marasciuolo, L., Gibelli, D., Cigada, A., Obertová, Z., Ratnayake, M., Poppa, P., Gabriel, P., Ritz-Timme, S., & Cattaneo, C. (2013).

- Pitfalls at the root of facial assessment on photographs: A quantitative study of accuracy in positioning facial landmarks. *International Journal of Legal Medicine*, 127(3), 699–706. <https://doi.org/10.1007/s00414-013-0850-7>
- De Angelis, D., Sala, R., Cantatore, A., Grandi, M., & Cattaneo, C. (2009). A new computer-assisted technique to aid personal identification. *International Journal of Legal Medicine*, 123(4), 351–356. <https://doi.org/10.1007/s00414-008-0311-x>
- Dirkmaat, D. C., Cabo, L. L., Ousley, S. D., & Symes, S. A. (2008). New perspectives in forensic anthropology. *American Journal of Physical Anthropology*, 137(S47), 33–52. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20948>
- Dryden, I. L., & Mardia, K. V. (2016). Statistical shape analysis with Applications in R. In *John Wiley & Sons*.
- Ercan, I., Ozdemir, S. T., Etoz, A., Sigirli, D., Tubbs, R. S., Loukas, M., & Guney, I. (2008). Facial asymmetry in young healthy subjects evaluated by statistical shape analysis. *Journal of Anatomy*, 213(6), 663–669. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2008.01002.x>
- Esri. (2014). *An overview of the Interpolation toolset*. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-interpolation-tools.htm>
- Esri. (2020). *How Spatial Autocorrelation (Global Moran's I) works—ArcGIS Pro / Documentation*. Esri Tool Reference. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/h-how-spatial-autocorrelation-moran-s-i-spatial-st.htm>
- ESRI. (2020a). *ArcGIS Online | Cloud-Based GIS Mapping Software*. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview>
- ESRI. (2020b). *ESI GIS Mapping Software, Location Intelligence & Spatial Analytics*. In *Web-page* (p. 1). <https://www.esri.com/en-us/home>
- Evans, R. (2014). Image Analysis: Forensic Facial Comparison: Issues and Misconceptions. In *Advances in Forensic Human Identification* (pp. 239–260). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16509-14>
- Evteev, A., Cardini, A. L., Morozova, I., & O'Higgins, P. (2014). Extreme climate, rather than population history, explains mid-facial morphology of Northern Asians. *American Journal of Physical Anthropology*, 153(3), 449–462. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22444>
- Fagertun, J., Harder, S., Rosengren, A., Moeller, C., Werge, T., Paulsen, R. R., & Hansen, T. F. (2014). 3D facial landmarks: Inter-operator variability of manual annotation. *BMC Medical Imaging*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/1471-2342-14-35>

- Fagertun, J., Wolffhechel, K., Pers, T. H., Nielsen, H. B., Gudbjartsson, D., Stefansson, H., Stefansson, K., Paulsen, R. R., & Jarmer, H. (2015). Predicting facial characteristics from complex polygenic variations. *Forensic Science International: Genetics*, *19*, 263–268. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2015.08.004>
- Farrera, A., García-Velasco, M., & Villanueva, M. (2016). Quantitative assessment of the facial features of a Mexican population dataset. *Forensic Science International*, *262*, 283.e1-283.e9. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.02.046>
- Feregrino Vejar, L., Gutiérrez Rojo, J., López Guzmán, M., & Rivas Gutiérrez, R. (2016). Línea estética de Ricketts en las diferentes maloclusiones. *Revista Española de Ortodoncia*, *46*(1), 33–37.
- Ferrario, V F, Sforza, C., Miani, A., & Serrao, G. (1995). A three-dimensional evaluation of human facial asymmetry. *Journal of Anatomy*, *186* ( Pt 1), 103–110.
- Ferrario, V F, Sforza, C., Pizzini, G., Vogel, G., & Miani, A. (1993). Sexual dimorphism in the human face assessed by euclidean distance matrix analysis. *Journal of Anatomy*, *183* ( Pt 3(Pt 3)), 593–600.
- Ferrario, Virgilio F., Sforza, C., Ciusa, V., Dellavia, C., & Tartaglia, G. M. (2001). The effect of sex and age on facial asymmetry in healthy subjects: A cross-sectional study from adolescence to mid-adulthood. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, *59*(4), 382–388. <https://doi.org/10.1053/joms.2001.21872>
- Fink, B., Grammer, K., Mitteroecker, P., Gunz, P., Schaefer, K., Bookstein, F. L., & Manning, J. T. (2005). Second to fourth digit ratio and face shape. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *272*(1576), 1995–2001. <https://doi.org/10.1098/rspb.2005.3179>
- FISWG. (2020). *Facial Identification Scientific Working Group*. <https://fiswg.org/faqs.html>
- Foley, R. A., Howells, W. W., Fagan, B. M., Lanpo, J., & Weiwen, H. (1992). Skull Shapes and the Map: Craniometric Analyses in the Dispersion of Modern Homo. *Journal of Field Archaeology*, *19*(3), 393. <https://doi.org/10.2307/529924>
- Fruciano, C. (2016). Measurement error in geometric morphometrics. In *Development Genes and Evolution* (Vol. 226, Issue 3, pp. 139–158). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s00427-016-0537-4>
- Gibelli, D., Obertová, Z., Ritz-Timme, S., Gabriel, P., Arent, T., Ratnayake, M., De Angelis, D., & Cattaneo, C. (2016). The identification of living persons on images: A literature review. In *Legal Medicine* (Vol. 19, pp. 52–60). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2016.02.001>

- Gilbert, S. F. (2005). *Biología del Desarrollo* (7<sup>a</sup> Edición). Médica Panamericana.
- González-José, R., Escapa, I., Neves, W. A., Cúneo, R., & Pucciarelli, H. M. (2011). Morphometric variables can be analyzed using cladistic methods: A reply to Adams et al. *Journal of Human Evolution*, 60(2), 244–245. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2010.11.001>
- González-José, R., Ramírez-Rozzi, F., Sardi, M., Martínez-Abadías, N., Hernández, M., & Pucciarelli, H. M. (2005). Functional-cranial approach to the influence of economic strategy on skull morphology. *American Journal of Physical Anthropology*, 128(4), 757–771. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20161>
- González-José, R., Van Der Molen, S. V., González-Pérez, E., & Hernández, M. (2004). Patterns of Phenotypic Covariation and Correlation in Modern Humans as Viewed from Morphological Integration. *American Journal of Physical Anthropology*, 123(1), 69–77. <https://doi.org/10.1002/ajpa.10302>
- Gould, S. J. (1966). Allometry and size in ontogeny and phylogeny. In *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society* (Vol. 41, Issue 4, pp. 587–640). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185x.1966.tb01624.x>
- Gould, Stephen Jay. (2005). *La falsa medida del hombre*. Crítica.
- Green, R. E., Krause, J., Briggs, A. W., Maricic, T., Stenzel, U., Kircher, M., Patterson, N., Li, H., Zhai, W., Fritz, M. H. Y., Hansen, N. F., Durand, E. Y., Malaspina, A. S., Jensen, J. D., Marques-Bonet, T., Alkan, C., Prüfer, K., Meyer, M., Burbano, H. A., ... Pääbo, S. (2010). A draft sequence of the neandertal genome. *Science*, 328(5979), 710–722. <https://doi.org/10.1126/science.1188021>
- Halberstein, R. A. (2001). The Application of Anthropometric Indices in Forensic Photography: Three Case Studies. *Journal of Forensic Sciences*, 46(6), 15168J. <https://doi.org/10.1520/jfs15168j>
- Hallgrímsson, B., Jamniczky, H., Young, N. M., Rolian, C., Parsons, T. E., Boughner, J. C., & Marcucio, R. S. (2009). Deciphering the palimpsest: Studying the relationship between morphological integration and phenotypic covariation. *Evolutionary Biology*, 36(4), 355–376. <https://doi.org/10.1007/s11692-009-9076-5>
- Hammer O., Harper D., R. P. (2013). PAST Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontological Electronica*, 9.
- Harvati, K., & Weaver, T. D. (2006). Human cranial anatomy and the differential preservation of population history and climate signatures. *Anatomical Record - Part A Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology*, 288(12), 1225–1233. <https://doi.org/10.1002/ar.a.20395>
- Hedrick, P. W. (2005). *Genetics of populations*. Jones and Bartlett Publishers.

- Hefner, J. T., & Spradley, M. K. (2018). Ancestry (forensic applications). In *The International Encyclopedia of Biological Anthropology* (pp. 1–3). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118584538.ieba0021>
- Hellenthal, G., Busby, G. B. J., Band, G., Wilson, J. F., Capelli, C., Falush, D., & Myers, S. (2014). A genetic atlas of human admixture history. *Science*, *343*(6172), 747–751. <https://doi.org/10.1126/science.1243518>
- Hennessy, R. J., Kinsella, A., & Waddington, J. L. (2002). 3D laser surface scanning and geometric morphometric analysis of craniofacial shape as an index of cerebro-craniofacial morphogenesis: Initial application to sexual dimorphism. *Biological Psychiatry*, *51*(6), 507–514. [https://doi.org/10.1016/S0006-3223\(01\)01327-0](https://doi.org/10.1016/S0006-3223(01)01327-0)
- Hennessy, R. J., McLearn, S., Kinsella, A., & Waddington, J. L. (2005). Facial surface analysis by 3D laser scanning and geometric morphometrics in relation to sexual dimorphism in cerebral-craniofacial morphogenesis and cognitive function. *Journal of Anatomy*, *207*(3), 283–295. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2005.00444.x>
- Hughes, C. E., Tise, M. L., Trammell, L. H., & Anderson, B. E. (2013). Cranial morphological variation among contemporary Mexicans: Regional trends, ancestral affinities, and genetic comparisons. *American Journal of Physical Anthropology*, *151*(4), 506–517. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22288>
- Humphries, A. L., Maxwell, A. B., Ross, A. H., & Ubelaker, D. H. (2015). A Geometric Morphometric Study of Regional Craniofacial Variation in Mexico. *International Journal of Osteoarchaeology*, *25*(6), 795–804. <https://doi.org/10.1002/oa.2345>
- IAI. (2020). *International Association for Identification*. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-73003-5\\_2283](https://doi.org/10.1007/978-0-387-73003-5_2283)
- Ibacache, M. V. T., Soto, G. M., & Galdames, I. S. (2010). Geometric morphometrics and the study of biologic shapes: From descriptive to quantitative morphology. *International Journal of Morphology*, *28*(4), 977–990. <https://doi.org/10.4067/s0717-95022010000400001>
- Imai, T., & Okami, K. (2019). Facial cues to age perception using three-dimensional analysis. *PLoS ONE*, *14*(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209639>
- James Rohlf, F., & Marcus, L. F. (1993). A revolution morphometrics. *Trends in Ecology & Evolution*, *8*(4), 129–132. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(93\)90024-J](https://doi.org/10.1016/0169-5347(93)90024-J)
- Johnson, N. A., Coram, M. A., Shriver, M. D., Romieu, I., Barsh, G. S., London, S. J., & Tang, H. (2011). Ancestral components of admixed genomes in a Mexican cohort. *PLoS Genetics*, *7*(12), 1002410.

<https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1002410>

- Kahn, D. M., & Shaw, R. B. (2010). Overview of current thoughts on facial volume and aging. In *Facial Plastic Surgery* (Vol. 26, Issue 5, pp. 350–355). <https://doi.org/10.1055/s-0030-1265024>
- Kendall, D. G. (1977). The diffusion of shape. *Advances in Applied Probability*, 9(3), 428–430. <https://doi.org/10.2307/1426091>
- Kleinberg, K. F., & Siebert, J. P. (2012). A study of quantitative comparisons of photographs and video images based on landmark derived feature vectors. *Forensic Science International*, 219(1–3), 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.01.014>
- Kleinberg, K. F., Vanezis, P., & Burton, A. M. (2007). Failure of Anthropometry as a Facial Identification Technique Using High-Quality Photographs. *Journal of Forensic Sciences*, 52(4), 779–783. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2007.00458.x>
- Klingenberg, C. P. (2003). A Developmental Perspective on Developmental Instability: Theory. *Developmental Instability: Causes and Consequences*, February, 14.
- Klingenberg, C. P. (2011). MorphoJ: An integrated software package for geometric morphometrics. *Molecular Ecology Resources*, 11(2), 353–357. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2010.02924.x>
- Klingenberg, C. P. (2015). Analyzing fluctuating asymmetry with geometric morphometrics: Concepts, methods, and applications. In *Symmetry* (Vol. 7, Issue 2, pp. 843–934). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/sym7020843>
- Klingenberg, C. P. (2016). Size, shape, and form: concepts of allometry in geometric morphometrics. In *Development Genes and Evolution* (Vol. 226, Issue 3, pp. 113–137). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s00427-016-0539-2>
- Kovacs, L., Zimmermann, A., Brockmann, G., Gühring, M., Baurecht, H., Papadopulos, N. A., Schwenzer-Zimmerer, K., Sader, R., Biemer, E., & Zeilhofer, H. F. (2006). Three-dimensional recording of the human face with a 3D laser scanner. *Journal of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgery*, 59(11), 1193–1202. <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2005.10.025>
- Lacruz, R. S., Stringer, C. B., Kimbel, W. H., Wood, B., Harvati, K., O’Higgins, P., Bromage, T. G., & Arsuaga, J. L. (2019). The evolutionary history of the human face. In *Nature Ecology and Evolution* (Vol. 3, Issue 5, pp. 726–736). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0865-7>
- Lam, Y. M., Pearson, O. M., & Smith, C. M. (1996). Chin morphology and sexual dimorphism in the fossil hominid mandible sample from Klasies River Mouth.

- American Journal of Physical Anthropology*, 100(4), 545–557. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-8644\(199608\)100:4<545::AID-AJPA8>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-8644(199608)100:4<545::AID-AJPA8>3.0.CO;2-P)
- Levine, R. A., Garza, J. R., Wang, P. T. H., Hurst, C. L., & Dev, V. R. (2003). Adult Facial Growth: Applications to Aesthetic Surgery. *Aesthetic Plastic Surgery*, 27(4), 265–268. <https://doi.org/10.1007/s00266-003-2112-4>
- Lewontin, R. C. (1972). The apportionment of human diversity. In *Evolutionary Biology* (pp. 381–397). Taylor and Francis.
- Liao, Q., Jin, X., & Zeng, W. (2012). Enhancing the symmetry and proportion of 3D face geometry. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(10), 1704–1716. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2012.26>
- Lieberman, D. (2011). *The evolution of the human head*. Belknap Press of Harvard University Press.
- Lieberman, D. E., Krovitz, G. E., Yates, F. W., Devlin, M., & St. Claire, M. (2004). Effects of food processing on masticatory strain and craniofacial growth in a retrognathic face. *Journal of Human Evolution*, 46(6), 655–677. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2004.03.005>
- Linder, W. (2009). *Digital Photogrammetry*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-92725-9>
- López Levi, L., & Ramírez, B. R. (2012). La región organización del territorio de la modernidad. *Territorios*, 1(27), 21–46.
- Lotto, F., & González, P. (2014). Developmental instability of craniofacial structures of Southamerican human populations. *Revista Argentina de Antropología Biológica*, 16(1). <https://doi.org/10.17139/raab.2014.0016.01.03>
- Lynnerup, N., Andersen, M., & Lauritsen, H. P. (2003). Facial image identification using Photomodeler®. *Legal Medicine*, 5(3), 156–160. [https://doi.org/10.1016/S1344-6223\(03\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S1344-6223(03)00054-3)
- Maddux, S. D., Butaric, L. N., Yokley, T. R., & Franciscus, R. G. (2017). Ecogeographic variation across morphofunctional units of the human nose. *American Journal of Physical Anthropology*, 162(1), 103–119. <https://doi.org/10.1002/ajpa.23100>
- Mallett, X., & Evison, M. P. (2013). Forensic Facial Comparison: Issues of Admissibility in the Development of Novel Analytical Technique. *Journal of Forensic Sciences*, 58(4), 859–865. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12127>
- Manica, A., Amos, W., Balloux, F., & Hanihara, T. (2007). The effect of ancient population bottlenecks on human phenotypic variation. *Nature*, 448(7151), 346–348. <https://doi.org/10.1038/nature05951>

- Marin A. Pilloud, J. T. H. (2016). Biological Distance Analysis. In *Biological Distance Analysis*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/c2014-0-01249-x>
- Martínez-Abadías, N., González-José, R., González-Martín, A., Van Der Molen, S., Talavera, A., Hernández, P., & Hernández, M. (2006). Phenotypic evolution of human craniofacial morphology after admixture: A geometric morphometrics approach. *American Journal of Physical Anthropology*, *129*(3), 387–398. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20291>
- McKeown, A. H., & Jantz, R. L. (2006). Comparison of Coordinate and Craniometric Data for Biological Distance Studies. In *Modern Morphometrics in Physical Anthropology* (pp. 215–230). Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers. [https://doi.org/10.1007/0-387-27614-9\\_9](https://doi.org/10.1007/0-387-27614-9_9)
- McKeown, A. H., & Schmidt, R. W. (2013). Geometric Morphometrics. In *Research Methods in Human Skeletal Biology* (pp. 325–359). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385189-5.00012-1>
- Mellion, Z. J., Behrents, R. G., & Johnston, L. E. (2013). The pattern of facial skeletal growth and its relationship to various common indexes of maturation. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *143*(6), 845–854. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2013.01.019>
- Mitteroecker, P., Gunz, P., Windhager, S., & Schaefer, K. (2013). A brief review of shape, form, and allometry in geometric morphometrics, with applications to human facial morphology. *Hystrix*, *24*(1), 59–66. <https://doi.org/10.4404/hystrix-24.1-6369>
- Moreno-Estrada, A., Gignoux, C. R., Fernández-López, J. C., Zakharia, F., Sikora, M., Contreras, A. V., Acuña-Alonzo, V., Sandoval, K., Eng, C., Romero-Hidalgo, S., Ortiz-Tello, P., Robles, V., Kenny, E. E., Nuño-Arana, I., Barquera-Lozano, R., Macín-Pérez, G., Granados-Arriola, J., Huntsman, S., Galanter, J. M., ... Bustamante, C. D. (2014). The genetics of Mexico recapitulates Native American substructure and affects biomedical traits. *Science*, *344*(6189), 1280–1285. <https://doi.org/10.1126/science.1251688>
- Nanda, R. S., Meng, H., Kapila, S., & Goorhuis, J. (1990). Growth changes in the soft tissue facial profile. *The Angle Orthodontist*, *60*(3), 177–190. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(1990\)060<0177:GCITST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(1990)060<0177:GCITST>2.0.CO;2)
- North, K. E., Crawford, M. H., & Relethford, J. H. (1999). Spatial variation of anthropometric traits in Ireland. *Human Biology; an International Record of Research*, *71*(5), 823–845.
- Núñez-Colín, C. A., & Escobedo-López, D. (2011). Uso correcto del análisis clúster en la caracterización de germoplasma vegetal. *Agronomía Mesoamericana*, *22*(2), 415. <https://doi.org/10.15517/am.v22i2.8746>

- Ohlrogge, S. et al. (2008). *Anthropological atlas of male facial features*. Verlag fur Polizeiwissenschaft. <https://trove.nla.gov.au/work/157366006>
- Ohlrogge, S. et al. (2009). *Anthropological atlas of female facial features*. Verlag fur Polizeiwissenschaft.
- Ojeda, J. V. (2019). El arribo de los españoles a la Península de Yucatán y el inicio del cambio en el paisaje biocultural de la región, siglo XVI. *BOLETÍN AMERICANISTA*, 78, 175–195.
- Osis, S. T., Hettinga, B. A., Macdonald, S. L., & Ferber, R. (2015). A novel method to evaluate error in anatomical marker placement using a modified generalized Procrustes analysis. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 18(10), 1108–1116. <https://doi.org/10.1080/10255842.2013.873034>
- Ousley, S., Jantz, R., & Freid, D. (2009). Understanding race and human variation: Why forensic anthropologists are good at identifying race. *American Journal of Physical Anthropology*, 139(1), 68–76. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21006>
- Oxnard, C., & O’Higgins, P. (2009). Biology Clearly Needs Morphometrics. Does Morphometrics Need Biology? *Biological Theory*, 4(1), 84–97. <https://doi.org/10.1162/biot.2009.4.1.84>
- Parker, S., Ferran, A., & Pijoan-Rotge, M. (2007). *El cuerpo humano*. Dorling Kindersley .
- Pascali, M. A., Giorgi, D., Bastiani, L., Buzzigoli, E., Henriquez, P., Matuszewski, B. J., Morales, M. A., & Colantonio, S. (2016). Face morphology: Can it tell us something about body weight and fat? *Computers in Biology and Medicine*, 76, 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2016.06.006>
- Paternoster, L., Zhurov, A. I., Toma, A. M., Kemp, J. P., St. Pourcain, B., Timpson, N. J., McMahon, G., McArdle, W., Ring, S. M., Smith, G. D., Richmond, S., & Evans, D. M. (2012). Genome-wide association study of three-dimensional facial morphology identifies a variant in PAX3 associated with nasion position. *American Journal of Human Genetics*, 90(3), 478–485. <https://doi.org/10.1016/j.ajhg.2011.12.021>
- Pavlicev, M., Cheverud, J. M., & Wagner, G. P. (2009). Measuring morphological integration using eigenvalue variance. *Evolutionary Biology*, 36(1), 157–170. <https://doi.org/10.1007/s11692-008-9042-7>
- Phillips, P. J., Grother, P., Micheals, R., Blackburn, D. M., Tabassi, E., & Bone, M. (2004). Face recognition vendor test 2002. *Presentation*, 44. <https://doi.org/10.1109/amfg.2003.1240822>
- Porter, G., & Doran, G. (2000). An anatomical and photographic technique for

- forensic facial identification. *Forensic Science International*, 114(2), 97–105. [https://doi.org/10.1016/S0379-0738\(00\)00290-5](https://doi.org/10.1016/S0379-0738(00)00290-5)
- Prahl-Andersen, B., Ligthelm-Bakker, A. S. W. M. R., Wattel, E., & Nanda, R. (1995). Adolescent growth changes in soft tissue profile. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 107(5), 476–483. [https://doi.org/10.1016/S0889-5406\(95\)70114-1](https://doi.org/10.1016/S0889-5406(95)70114-1)
- Premkumar, S. (2011). Textbook of Craniofacial Growth. In *Textbook of Craniofacial Growth*. Jaypee Brothers Medical Publishers. <https://doi.org/10.5005/jp/books/11294>
- Prugnolle, F., Manica, A., & Balloux, F. (2005). Geography predicts neutral genetic diversity of human populations [1]. In *Current Biology* (Vol. 15, Issue 5, p. R159). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.02.038>
- Purcell, S., Neale, B., Todd-Brown, K., Thomas, L., Ferreira, M. A. R., Bender, D., Maller, J., Sklar, P., De Bakker, P. I. W., Daly, M. J., & Sham, P. C. (2007). PLINK: A tool set for whole-genome association and population-based linkage analyses. *American Journal of Human Genetics*, 81(3), 559–575. <https://doi.org/10.1086/519795>
- Quinto-Sánchez, M., Adhikari, K., Acuña-Alonzo, V., Cintas, C., Silva de Cerqueira, C. C., Ramallo, V., Castillo, L., Farrera, A., Jaramillo, C., Arias, W., Fuentes, M., Everardo, P., de Avila, F., Gomez-Valdés, J., Hünemeier, T., Gibbon, S., Gallo, C., Poletti, G., Rosique, J., ... González-José, R. (2015). Facial asymmetry and genetic ancestry in Latin American admixed populations. *American Journal of Physical Anthropology*, 157(1), 58–70. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22688>
- Quinto-Sánchez, M., Cintas, C., De Cerqueira, C. C. S., Ramallo, V., Acuña-Alonzo, V., Adhikari, K., Castillo, L., Gomez-Valdés, J., Everardo, P., De Avila, F., Hünemeier, T., Jaramillo, C., Arias, W., Fuentes, M., Gallo, C., Poletti, G., Schuler-Faccini, L., Bortolini, M. C., Canizales-Quinteros, S., ... González-José, R. (2017). Socioeconomic status is not related with facial fluctuating asymmetry: Evidence from latin-american populations. *PLoS ONE*, 12(1), e0169287. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169287>
- Quinto-Sánchez, M., Muñoz-Muñoz, F., Gomez-Valdes, J., Cintas, C., Navarro, P., Cerqueira, C. C. S. De, Paschetta, C., De Azevedo, S., Ramallo, V., Acuña-Alonzo, V., Adhikari, K., Fuentes-Guajardo, M., Hünemeier, T., Everardo, P., De Avila, F., Jaramillo, C., Arias, W., Gallo, C., Poletti, G., ... Gonzalez-Jose, R. (2018). Developmental pathways inferred from modularity, morphological integration and fluctuating asymmetry patterns in the human face. *Scientific Reports*, 8(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19324-y>
- Relethford, J. H. (2016). Biological distances and population genetics in bioarchaeology. In *Biological Distance Analysis: Forensic and*

*Bioarchaeological Perspectives* (pp. 23–33). Elsevier Inc.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801966-5.00002-0>

- Relethford, J. H., & Blangero, J. (1990). Detection of differential gene flow from patterns of quantitative variation. *Human Biology*, 62(1), 5–25.
- Relethford, John H. (1994). Craniometric variation among modern human populations. *American Journal of Physical Anthropology*, 95(1), 53–62.  
<https://doi.org/10.1002/ajpa.1330950105>
- Relethford, John H. (2008). Geostatistics and spatial analysis in biological anthropology. *American Journal of Physical Anthropology*, 136(1), 1–10.  
<https://doi.org/10.1002/ajpa.20789>
- Relethford, John H. (2009). Race and global patterns of phenotypic variation. *American Journal of Physical Anthropology*, 139(1), 16–22.  
<https://doi.org/10.1002/ajpa.20900>
- Relethford, John H. (2010). Population-specific deviations of global human craniometric variation from a neutral model. *American Journal of Physical Anthropology*, 142(1), 105–111. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21207>
- Richmond, S., Howe, L. J., Lewis, S., Stergiakouli, E., & Zhurov, A. (2018). Facial genetics: A brief overview. In *Frontiers in Genetics* (Vol. 9, Issue OCT, p. 462). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00462>
- Richtsmeier, J. T., DeLeon, V. B., & Lele, S. R. (2002). The promise of geometric morphometrics. *American Journal of Physical Anthropology, Suppl 35*, 63–91.
- Ritz-Timme, S., Gabriel, P., Obertová, Z., Boguslawski, M., Mayer, F., Drabik, A., Poppa, P., De Angelis, D., Ciaffi, R., Zanotti, B., Gibelli, D., & Cattaneo, C. (2011). A new atlas for the evaluation of facial features: Advantages, limits, and applicability. *International Journal of Legal Medicine*, 125(2), 301–306.  
<https://doi.org/10.1007/s00414-010-0446-4>
- Robinson, C., & Terhune, C. E. (2017). Error in geometric morphometric data collection: Combining data from multiple sources. *American Journal of Physical Anthropology*, 164(1), 62–75. <https://doi.org/10.1002/ajpa.23257>
- Roseman, C. C. (2004). Detecting interregionally diversifying natural selection on modern human cranial form by using matched molecular and morphometric data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(35), 12824–12829. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402637101>
- Roseman, C. C., & Weaver, T. D. (2004). Multivariate apportionment of global human craniometric diversity. *American Journal of Physical Anthropology*, 125(3), 257–263. <https://doi.org/10.1002/ajpa.10424>
- Roseman, C. C., & Weaver, T. D. (2007). Molecules versus morphology? Not for the

- human cranium. *BioEssays*, 29(12), 1185–1188.  
<https://doi.org/10.1002/bies.20678>
- Ross, A. H., McKeown, A. H., & Konigsberg, L. W. (1999). Allocation of Crania to Groups Via the “New Morphometry.” *Journal of Forensic Sciences*, 44(3), 1451-1453. <https://doi.org/10.1520/jfs14513j>
- Ross, A. H., & Williams, S. (2008). Testing repeatability and error of coordinate landmark data acquired from crania. *Journal of Forensic Sciences*, 53(4), 782–785. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2008.00751.x>
- Ruiz-Linares, A., Adhikari, K., Acuña-Alonzo, V., Quinto-Sanchez, M., Jaramillo, C., Arias, W., Fuentes, M., Pizarro, M., Everardo, P., de Avila, F., Gómez-Valdés, J., León-Mimila, P., Hunemeier, T., Ramallo, V., Silva de Cerqueira, C. C., Burley, M.-W., Konca, E., de Oliveira, M. Z., Veronez, M. R., ... Gonzalez-José, R. (2014). Admixture in Latin America: Geographic Structure, Phenotypic Diversity and Self-Perception of Ancestry Based on 7,342 Individuals. *PLoS Genetics*, 10(9), e1004572. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1004572>
- Saks, M. J. (2010). Forensic identification: From a faith-based “Science” to a scientific science. *Forensic Science International*, 201(1–3), 14–17. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.03.014>
- Salazar-Flores, J., Zuñiga-Chiquette, F., Rubi-Castellanos, R., Álvarez-Miranda, J. L., Zetina-Hernández, A., Martínez-Sevilla, V. M., González-Andrade, F., Corach, D., Vullo, C., Álvarez, J. C., Lorente, J. A., Sánchez-Diz, P., Herrera, R. J., Cerda-Flores, R. M., Muñoz-Valle, J. F., & Rangel-Villalobos, H. (2015). Admixture and genetic relationships of Mexican Mestizos regarding Latin American and Caribbean populations based on 13 CODIS-STRs. *HOMO*, 66(1), 44–59. <https://doi.org/10.1016/j.jchb.2014.08.005>
- Samal, A., Subramani, V., & Marx, D. (2007). Analysis of sexual dimorphism in human face. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 18(6), 453–463. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2007.04.010>
- Schwartz, J. H. (2007). *Skeleton keys : an introduction to human skeletal morphology, development, and analysis*. Oxford University Press.
- Schwartz, J. H., & Tattersall, I. (2000). The human chin revisited: What is it and who has it? *Journal of Human Evolution*, 38(3), 367–409. <https://doi.org/10.1006/jhev.1999.0339>
- Serrano, C., Villanueva, M., Luy, J., & Link, K. F. (1999). Sistema computarizado de identificación personal con rasgos morfológicos faciales. *Antropología Física Latinoamericana*, 2, 119–134.
- Sforza, C., Dolci, C., Tommasi, D. G., Pisoni, L., De Menezes, M., & Elamin, F. (2014). Three-dimensional facial distances of Northern Sudanese persons from

- childhood to young adulthood. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 42(5), e318–e326. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2013.10.013>
- Shaner, D. J., Peterson, A. E., Beattie, O. B., & Stephen Bamforth, J. (2001). Soft tissue facial resemblance in families and syndrome-affected individuals. *American Journal of Medical Genetics*, 102(4), 330–341. <https://doi.org/10.1002/ajmg.1491>
- Shea, B. T. (1977). Eskimo craniofacial morphology, cold stress and the maxillary sinus. *American Journal of Physical Anthropology*, 47(2), 289–300. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330470209>
- Shriner, D., Tekola-Ayele, F., Adeyemo, A., & Rotimi, C. N. (2014). Genome-wide genotype and sequence-based reconstruction of the 140,000 year history of modern human ancestry. *Scientific Reports*, 4. <https://doi.org/10.1038/srep06055>
- Silva-Zolezzi, I., Hidalgo-Miranda, A., Estrada-Gil, J., Fernandez-Lopez, J. C., Uribe-Figueroa, L., Contreras, A., Balam-Ortiz, E., Del Bosque-Plata, L., Velazquez-Fernandez, D., Lara, C., Goya, R., Hernandez-Lemus, E., Davila, C., Barrientos, E., March, S., & Jimenez-Sanchez, G. (2009). Analysis of genomic diversity in Mexican Mestizo populations to develop genomic medicine in Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(21), 8611–8616. <https://doi.org/10.1073/pnas.0903045106>
- Singleton, M. (2002). Patterns of cranial shape variation in the Papionini (Primates: Cercopithecinae). *Journal of Human Evolution*, 42(5), 547–578. <https://doi.org/10.1006/jhev.2001.0539>
- Slice, D. E. (2006). Modern Morphometrics. *Modern Morphometrics in Physical Anthropology*, 1–45. [https://doi.org/10.1007/0-387-27614-9\\_1](https://doi.org/10.1007/0-387-27614-9_1)
- Smeets, D., Claes, P., Vandermeulen, D., & Clement, J. G. (2010). Objective 3D face recognition: Evolution, approaches and challenges. *Forensic Science International*, 201(1–3), 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.03.023>
- Sneath, P. H. A., & Sokal, R. R. (1973). *Numerical taxonomy. The principles and practice of numerical classification.*
- Sokal, R. R., Jacquez, G. M., & Wooten, M. C. (1989). Spatial autocorrelation analysis of migration and selection. *Genetics*, 121(4), 845–855. [https://doi.org/10.1016/S1573-4471\(07\)04053-3](https://doi.org/10.1016/S1573-4471(07)04053-3)
- Sokal, Robert R., & Oden, N. L. (1978). Spatial autocorrelation in biology: 1. Methodology. *Biological Journal of the Linnean Society*, 10(2), 199–228. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.1978.tb00013.x>
- Solano, P., Ravel, S., & de Meeûs, T. (2010). How can tsetse population genetics

- contribute to African trypanosomiasis control? In *Trends in Parasitology* (Vol. 26, Issue 5, pp. 255–263). Elsevier Current Trends. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2010.02.006>
- Spencer, W. (2003). *The Journey of Man: A genetic odyssey*. Princeton University Press.
- Spradley, K. (2016). Biological distance, migrants, and reference group selection in forensic anthropology. In *Biological Distance Analysis: Forensic and Bioarchaeological Perspectives* (pp. 231–244). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801966-5.00012-3>
- Spradley, M. K. (2014). Toward estimating geographic origin of migrant remains along the United States-Mexico border. *Annals of Anthropological Practice*, 38(1), 101–110. <https://doi.org/10.1111/napa.12045>
- Taylor, K. T. (2000). *Forensic Art and Illustration*. CRC Press.
- Templeton, A. R. (2019). Gene Flow and Subdivided Populations. In *Human Population Genetics and Genomics* (pp. 155–193). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386025-5.00006-3>
- Tise, M. L., Kimmerle, E. H., & Spradley, M. K. (2014). Craniometric variation of diverse populations in florida: Identification challenges within a border state. *Annals of Anthropological Practice*, 38(1), 111–123. <https://doi.org/10.1111/napa.12046>
- Toma, A. M., Zhurov, A. I., Playle, R., Marshall, D., Rosin, P. L., & Richmond, S. (2012). The assessment of facial variation in 4747 British school children. *European Journal of Orthodontics*, 34(6), 655–664. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjr106>
- Tome, P., Fierrez, J., Vera-Rodriguez, R., & Ramos, D. (2013). Identification using face regions: Application and assessment in forensic scenarios. In *Forensic Science International* (Vol. 233, Issues 1–3, pp. 75–83). <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.08.020>
- Tome, P., Vera-Rodriguez, R., Fierrez, J., & Ortega-Garcia, J. (2015). Facial soft biometric features for forensic face recognition. *Forensic Science International*, 257, 271–284. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.09.002>
- U.S. Government. (2014). *Federal Rules of Evidence*.
- Urbanová, P., & Ross, A. H. (2016). Advanced methods in 3-D craniofacial morphological analysis. In *Biological Distance Analysis: Forensic and Bioarchaeological Perspectives* (pp. 61–90). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801966-5.00004-4>
- Van Dongen, S. (2014). Associations among facial masculinity, physical strength,

- fluctuating asymmetry and attractiveness in young men and women. *Annals of Human Biology*, 41(3), 205–213. <https://doi.org/10.3109/03014460.2013.847120>
- Vanezis, P., Lu, D., Cockburn, J., Gonzalez, A., McCombe, G., Trujillo, O., & Vanezis, M. (1996). Morphological Classification of Facial Features in Adult Caucasian Males Based on an Assessment of Photographs of 50 Subjects. *Journal of Forensic Sciences*, 41(5), 13998J. <https://doi.org/10.1520/jfs13998j>
- Villanueva, M. (2010). *Morfología Facial. Estudios en población mexicana através de fotografías*. Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Vioarsdóttir, U. S., O’Higgins, P., & Stringer, C. (2002). A geometric morphometric study of regional differences in the ontogeny of the modern human facial skeleton. *Journal of Anatomy*, 201(3), 211–229. <https://doi.org/10.1046/j.1469-7580.2002.00092.x>
- Von Cramon-Taubadel, N., Frazier, B. C., & Lahr, M. M. (2007). The problem of assessing landmark error in geometric morphometrics: Theory, methods, and modifications. *American Journal of Physical Anthropology*, 134(1), 24–35. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20616>
- Wang, S., Ray, N., Rojas, W., Parra, M. V., Bedoya, G., Gallo, C., Poletti, G., Mazzotti, G., Hill, K., Hurtado, A. M., Camrena, B., Nicolini, H., Klitz, W., Barrantes, R., Molina, J. A., Freimer, N. B., Bortolini, M. C., Salzano, F. M., Petzl-Erler, M. L., ... Ruiz-Linares, A. (2008). Geographic patterns of genome admixture in latin American mestizos. *PLoS Genetics*, 4(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1000037>
- Weisensee, K. E. (2013). Assessing the relationship between fluctuating asymmetry and cause of death in skeletal remains: A test of the developmental origins of health and disease hypothesis. *American Journal of Human Biology*, 25(3), 411–417. <https://doi.org/10.1002/ajhb.22390>
- Wen, L., Guo, G., & Li, X. (2014). A study on the influence of body weight changes on face recognition. *IJCB 2014 - 2014 IEEE/IAPR International Joint Conference on Biometrics*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/BTAS.2014.6996243>
- Winslow, V. L. (2015). *Classic Human Anatomy in Motion: The Artist’s Guide to the Dynamics of Figure Drawing*. Watson-Guption.
- Yang, J., Lee, S. H., Goddard, M. E., & Visscher, P. M. (2011). GCTA: A tool for genome-wide complex trait analysis. *American Journal of Human Genetics*, 88(1), 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.ajhg.2010.11.011>
- Yokley, T. R. (2009). Ecogeographic variation in human nasal passages. *American Journal of Physical Anthropology*, 138(1), 11–22. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20893>

- Yoshino, M., Matsuda, H., Kubota, S., Imaizumi, K., & Miyasaka, S. (2000). Computer-assisted facial image identification system using a 3-D physiognomic range finder. *Forensic Science International*, *109*(3), 225–237. [https://doi.org/10.1016/S0379-0738\(00\)00149-3](https://doi.org/10.1016/S0379-0738(00)00149-3)
- Yoshino, M., Noguchi, K., Atsuchi, M., Kubota, S., Imaizumi, K., Thomas, C. D. L., & Clement, J. G. (2002). Individual identification of disguised faces by morphometrical matching. *Forensic Science International*, *127*(1–2), 97–103. [https://doi.org/10.1016/S0379-0738\(02\)00115-9](https://doi.org/10.1016/S0379-0738(02)00115-9)
- Yoshino, M., Taniguchi, M., Imaizumi, K., Miyasaka, S., Tanijiri, T., Yano, H., David, C., Thomas, L., & Clement, J. G. (2005). A new retrieval system for a database of 3D facial images. *Forensic Science International*, *148*(2–3), 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2004.04.074>
- Zaidi, A. A., Mattern, B. C., Claes, P., McEcoy, B., Hughes, C., & Shriver, M. D. (2017). Investigating the case of human nose shape and climate adaptation. *PLoS Genetics*, *13*(3), e1006616. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1006616>
- Zedníková Malá, P., Krajíček, V., & Velemínská, J. (2018). How tight is the relationship between the skeletal and soft-tissue facial profile: A geometric morphometric analysis of the facial outline. *Forensic Science International*, *292*, 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.09.014>
- Zelditch, M. (2004). *Geometric morphometrics for biologists : a primer*. Elsevier Academic Press.