

Detección de cambios durante el envejecimiento del rostro y del esqueleto facial humano

Claudia Paulina Cruz Venegas¹, César Espinoza Campuzano² y Abigail Meza Peñaloza³

¹Posgrado en Antropología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.

²Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.

³Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.

*Corresponding Author: paulinacvenegas@comunidad.unam.mx

RESUMEN

El rostro humano experimenta modificaciones morfológicas a lo largo de la ontogenia, desde la fecundación hasta la vejez. En esta última etapa, la forma facial refleja tanto el descenso de los tejidos blandos como el incremento de la reabsorción ósea, más allá de los cambios asociados al edentulismo. No obstante, los estudios que analizan conjuntamente ambos procesos en los mismos individuos siguen siendo escasos. El objetivo de esta investigación fue caracterizar los cambios de forma del tejido blando facial y del esqueleto craneofacial durante el envejecimiento, con el fin de identificar patrones morfológicos sensibles a la edad. Se realizó un estudio transversal con 108 tomografías computarizadas de adultos mexicanos vivos, a partir de las cuales se generaron modelos tridimensionales de tejido blando facial y esqueleto craneofacial (n=216). Los modelos se analizaron mediante morfometría geométrica tridimensional y estadística multivariada. Los resultados mostraron, en el esqueleto craneofacial, cambios en las aberturas orbitarias, retracción del maxilar, ampliación de la abertura piriforme y descenso de la espina nasal anterior. En el tejido blando facial se identificaron párpados caídos, descenso del borde infraorbitario, caída de la punta nasal, aumento en la región del filtrum y adelgazamiento de los labios. Además, se detectó una relación alométrica en la variación de la forma facial y un efecto significativo de la edad sobre la forma. Estos hallazgos indican que el envejecimiento se manifiesta mediante patrones de cambio morfológico cuantificables tanto en el tejido blando facial como en el esqueleto craneofacial, lo que aporta una base metodológica útil para la estimación de edad en adultos.

Palabras clave:

Ontogenia
Envejecimiento craneofacial
Tejido blando facial
Morfometría geométrica 3D
Tomografía computarizada (TC)
Estimación de edad

ABSTRACT

The human face undergoes morphological changes throughout ontogeny, from fertilization to old aging. In this final stage, facial form reflects both soft-tissue descent and increased bone resorption, beyond the changes associated with edentulism. Nevertheless, studies that jointly analyze both processes in the same individuals remain scarce. The aim of this study was to characterize shape changes in the facial soft tissue and the craniofacial skeleton during aging to identify age-sensitive morphological patterns. A cross-sectional study was conducted using 108 computed tomography scans from living Mexican adults, from which three-dimensional models of the facial soft tissues and the craniofacial skeleton were generated (n=216). The models were analyzed using three-dimensional geometric morphometrics and multivariate statistics. In the craniofacial skeleton, the results show changes in the orbital apertures, maxillary retrusion, enlargement of the piriform aperture, and inferior displacement of the anterior nasal spine. In the facial soft tissues, drooping eyelids, descent of the infraorbital margin, nasal tip ptosis, increased prominence of the philtrum region, and lip thinning were identified. In addition, an allometric relationship was detected in facial shape variation, along with a significant effect of age on shape. These findings indicate that aging is expressed through quantifiable patterns of morphological change in both the facial soft tissues and the craniofacial skeleton, providing a useful methodological basis for adult age estimation.

Keywords:

Ontogeny
Craniofacial aging
Facial soft tissue
3D geometric morphometrics
Computed tomography (CT)
Age estimation

Introducción

Durante la ontogenia humana, la forma facial cambia de manera diferencial en el tejido blando y en el esqueleto craneofacial. El tejido blando facial incluye dermis, tejido adiposo y la musculatura asociada (Parker, 2007). Estos componentes presentan dinámicas de crecimiento y remodelación que no necesariamente coinciden con las del tejido óseo subyacente; además, el tejido blando participa en la estimulación del crecimiento del hueso facial (Premkumar, 2011). Esta relación resulta clave para comprender la configuración facial en la adultez y su transformación con el envejecimiento. A nivel del desarrollo, el tercio superior facial alcanza gran parte de su maduración hacia la adolescencia temprana, alrededor de los 12 años, mientras que los tercios medio e inferior continúan ajustándose hasta aproximarse a un aspecto adulto hacia los 20 años (Mellion, Behrents y Johnston, 2013). En la adultez, tras un periodo de estabilidad relativa, se inicia la senescencia. En el tejido blando, los cambios pueden comenzar alrededor de los 35 años, aunque su expresión visible suele manifestarse décadas después —52 y 55 años en mujeres, y alrededor de los 60 años en hombres— (Windhager et al., 2019). Entre los mecanismos descritos se encuentran la disminución de colágeno, la pérdida de elasticidad, el adelgazamiento de la epidermis y la redistribución del tejido adiposo; junto con la gravedad, estos procesos contribuyen a la flacidez, las arrugas y las líneas de expresión (Levine et al., 2003; Imai y Okami, 2019).

El envejecimiento facial también involucra la remodelación del esqueleto craneofacial. Tradicionalmente, la retrusión mandibular se atribuyó al edentulismo y a la reabsorción alveolar asociada (Cawood y Howell, 1988; Bartlett, Grossman y Whitaker, 1992). Sin embargo, se han documentado cambios óseos en individuos dentados, incluida reabsorción en el maxilar, modificaciones en las orbitas y en la abertura piriforme, lo que sugiere un componente de envejecimiento independiente de la pérdida dental (Pessa et al., 1998, 1999, 2008; Mendelson et al., 2007; Shaw y Kahn, 2007; Kahn y Shaw, 2008). Pese a ello, persiste el debate sobre la contribución relativa de tejido blando y del hueso en la pérdida de proyección del tercio medio facial con la

edad, así como sobre la consistencia de estos patrones durante la adultez (Levine et al., 2003; Levine, 2008). Si bien gran parte de la evidencia disponible proviene del ámbito clínico, desde la antropología forense se ha reconocido que aún existe una escasez de información sistematizada sobre los cambios óseos de la cabeza y la cara en la adultez, a pesar de su relevancia para la reconstrucción facial, la progresión etaria y otras aplicaciones de identificación humana (Albert, Ricanek y Patterson, 2007). Un aspecto adicional es metodológico, ya que gran parte de la evidencia proviene de medidas lineales en radiografías y fotografías bidimensionales, lo que limita la caracterización de estructuras inherentemente tridimensionales. En consecuencia, es necesario emplear enfoques que cuantifiquen la forma en tres dimensiones tanto en el rostro como en el esqueleto craneofacial.

En este marco, la presente investigación se orienta a evaluar de manera conjunta el tejido blando facial y el esqueleto craneofacial desde la juventud hasta la vejez, utilizando modelos 3D derivados de tomografías computarizadas. El objetivo general es identificar y cuantificar indicadores morfológicos sensibles a la edad, capaces de capturar el cambio de forma en ambos niveles tisulares. A partir de ello, se plantea que el envejecimiento se expresa mediante patrones de cambio de forma cuantificables tanto en el rostro como en el esqueleto craneofacial, y que su caracterización tridimensional permitirá proponer indicadores morfológicos útiles para la estimación de edad en adultos.

Material y Método

Procedencia de los datos

Se tuvo acceso a 305 tomografías computarizadas (TC) de la región cefálica correspondientes a individuos mexicanos vivos. La muestra provino de tres instituciones: 45 TC del Laboratorio de Osteología Antropológica (IIA-UNAM), 107 TC de la clínica privada CB Dental (Ciudad de México) y 153 TC del Hospital General del estado de Zacatecas. El acceso y uso de los datos se realizó conforme a normas bioéticas y bajo protocolos institucionales de privacidad y confidencialidad.

Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron TC que permitieran una visualización completa y nítida del tejido blando facial y del esqueleto craneofacial. Se excluyeron TC con boca abierta, movimiento durante el escaneo, artefactos que impidieran la visualización (p. ej., dispositivos u objetos), fracturas o patologías con potencial de alterar la morfología facial, así como individuos menores de 17 años. Tras aplicar estos criterios, se seleccionaron 108 TC para los análisis.

Segmentación y reconstrucción de modelos 3D

A partir de las TC seleccionadas se generaron modelos tridimensionales del tejido blando facial (rostro) y del esqueleto craneofacial mediante un flujo de trabajo manual y semiautomático de segmentación en 3D Slicer (Fedorov et al., 2012).

Muestra

La muestra estuvo integrada por 108 individuos adultos (47 hombres y 61 mujeres), de quienes se obtuvieron los 216 modelos 3D: 108 del tejido blando facial y 108 del esqueleto craneofacial.

Las edades estuvieron comprendidas entre 18 y 99 años. Para el análisis, los individuos se agruparon en cuatro categorías etarias: 18–36 años (n=18), 37–56 años (n=22), 57–68 años (n=34) y 69–99 años (n=34).

Digitalización de landmarks y semilandmarks

En cada modelo 3D del tejido blando facial se digitalizaron 41 landmarks anatómicos; sus definiciones y clasificación se presentan en la Tabla 1, y su localización en la Figura 1. En los modelos 3D del esqueleto craneofacial se digitalizaron 31 landmarks anatómicos y 30 curvas de semilandmarks; sus definiciones se detallan en la Tabla 2 y su ubicación se ilustra en la Figura 2. La delimitación de las curvas sobre el hueso maxilar se realizó mediante la función Plane del módulo Markups de 3D Slicer, lo que permitió establecer una distribución equidistante de los puntos a lo largo de cada curva. No se aplicó deslizamiento (*sliding*) a los semilandmarks, debido a que las curvas fueron definidas mediante puntos equidistantes sobre trayectorias anatómicas previamente delimitadas y se buscó conservar esa configuración original para el análisis. Todas las digitalizaciones se realizaron en 3D Slicer.

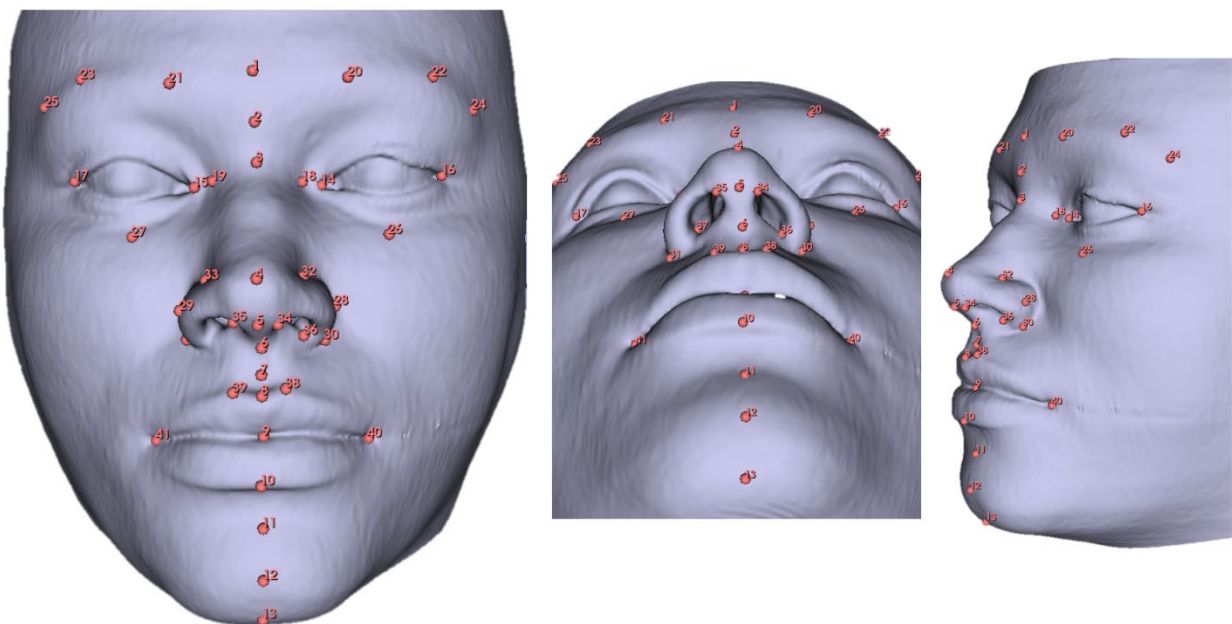


Figura 1. Ubicación del protocolo de 41 landmarks en el modelo tridimensional del rostro. Se muestran tres normas anatómicas del rostro con la localización de todos los puntos de referencia.

Tabla 1. Definiciones anatómicas de los 41 landmarks en el rostro.

No.	Nombre	Tipo	Definición anatómica
Landmarks sagitales			
1	Glabela	II	Punto sobre la línea media más anterior en el hueso frontal.
2	Nasion	II	Punto medio de la sutura nasofrontal.
3	Selion	II	Punto más profundo en la línea media del contorno del tejido blando frontonasal.
4	Pronasal	I	Punto más anterior proyectado en la nariz.
5	Columela	II	Punto medio de la cresta de la columela a nivel de los puntos superiores de la fosa nasal.
6	Subnasal	II	Punto medio en la unión entre el borde inferior del tabique nasal y la zona del filtrum.
7	Subespinal	II	Punto medio más posterior del filtrum (surco nasolabial).
8	Labial superior	I	Punto medio del borde bermellón sobre el labio superior.
9	Stomion	II	Punto medio de la fisura labial cuando los labios están cerrados naturalmente.
10	Labial inferior	I	Punto medio del borde vermilion del labio inferior.
11	Supramental	II	Punto más profundo de la concavidad sublabial inferior y el mentón.
12	Pogonion	I	Punto medio más anterior del mentón.
13	Gnathion	II	Punto en la línea media del borde inferior de la barbilla.
Landmarks bilaterales			
14, 15	Endocanthion	I	Punto de tejido blando situado en la comisura interna de cada fisura ocular.
16, 17	Exocanthion	I	Punto de tejido blando situado en la comisura externa de cada fisura ocular.
18, 19	Maxilofrontal	II	Punto de tejido blando situado en cada margen lateral de la base de la raíz nasal a nivel del nivel del endocanthion.
20, 21	Supra orbital	II	Punto de tejido blando situado en el nivel más superior de cada reborde supraorbitario. Este punto de referencia está cerca del punto antropométrico orbital superior, que se define como el punto más alto del borde inferior de la ceja.
22, 23	Superciliar	II	Punto sobre el arco superciliar, en la parte más alta de la ceja.
24, 25	Frontotemporal	II	Punto más medial sobre la cresta temporal del hueso frontal.
26, 27	Orbital	II	Punto de tejido blando localizado en el borde inferior del orbital. Suele caer a lo largo de la mitad lateral del margen orbital.
28, 29	Alar	I	Punto más lateral de cada contorno alar de la nariz.
30, 31	Sub alar	II	Punto situado en la inserción de cada base alar de la nariz.
32, 33	Supra alar	II	Punto situado en la inserción superior del alar de la nariz.
34, 35	Nostril top point	II	Punto más alto de cada fosa nasal o el punto terminal superior de cada eje de la fosa nasal. Este punto de referencia está cerca del punto de rotura de la columela de la nariz.
36, 37	Nostril base point	II	Punto más bajo de cada fosa nasal o el punto terminal inferior de cada eje de la fosa nasal.
38, 39	Crista philtri	I	Punto en el que se cruzan la línea del borde bermellón y el margen elevado del filtrum.
40, 41	Cheilion	I	Punto situado en cada comisura labial.

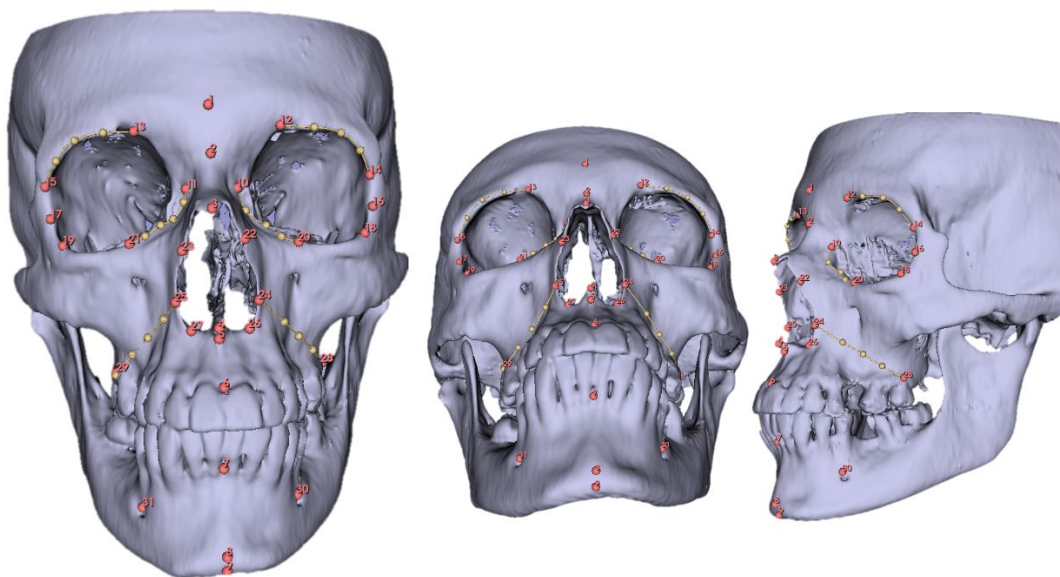
**Figura 2.** Ubicación del protocolo de 31 landmarks y 30 semilandmarks en el modelo tridimensional. Se muestran las tres normas anatómicas del cráneo con la localización de todos los puntos de referencia.

Tabla 2. Definiciones anatómicas de los 31 landmarks y 30 semilandmarks craneofaciales.

No.	Nombre	Tipo	Definición anatómica
Landmarks sagitales			
1	Glabela	II	Punto sobre la línea media más anterior en el hueso frontal.
2	Nasion	I	Intersección de las suturas naso frontales en el plano medio.
3	Rinion	I	Punto distal de la sutura de los huesos nasales.
4	Espina nasal anterior	I	Punto medio más anterior de la espina nasal del maxilar.
5	Subespinal	II	Punto medio que se localiza en la zona más profunda de la concavidad anterior del maxilar, entre el límite alveolar y la espina nasal.
6	Prosthion	I	Punto en medio del arco alveolar entre los incisivos superiores.
7	Infradental anterior	I	Punto anterior del reborde alveolar entre los incisivos inferiores.
8	Pogonion	II	Punto más prominente del borde anterior de la sínfisis mandibular.
9	Gnathion	II	Punto medio en el borde inferior de la mandíbula.
Landmarks bilaterales			
10, 11	Maxilofrontal (Dacryon)	II	Punto donde la cresta lacrimal se encuentra con la sutura frontomaxilar.
12, 13	Supra orbital	II	Punto situado de lado medial con respecto a la escotadura supraorbitaria (foramen).
14, 15	Fronto cigomático	I	Punto de la sutura frontocigomática a nivel del reborde orbitario lateral.
16, 17	Ectoconchion	II	Punto lateral del borde externo de la órbita, en el eje trazado desde el maxilofrontal paralelo al borde superior de la órbita, que la divide en dos mitades iguales.
18, 19	Margen infero lateral orbital	II	Punto lateral en la curva inferior externa de la órbita.
20, 21	Orbital	I	Punto inferior del borde orbital. Arriba del foramen infraorbitario.
22, 23	Sutura naso maxilar	I	Punto entre la sutura del nasal y el maxilar.
24, 25	Alar	II	Punto más lateral de la abertura nasal en un plano transversal.
26, 27	Abertura nasal inferior	II	Punto más inferior de la abertura nasal desde la vista frontal.
28, 29	Ectomolar	II	Punto más externo lateral del arco alveolar del maxilar, generalmente a nivel del segundo molar.
30, 31	Mentoniano	I	Punto sobre el foramen mentoniano situado debajo de las raíces de los premolares de la mandíbula.
Semilandmarks			
32 - 36	Curva bilateral semilandmarks	III	Curva hecha con 5 puntos que delinear el borde inferomedial de la órbita. Se parte del landmark 10 y se llega al 20. Y del landmark 11 al 21.
42 - 46	Curva bilateral semilandmarks	III	Curva hecha de 5 puntos que delinear el borde superior de la órbita. Se parte del landmark 12 y se llega al 14. Y del landmark 13 al 15.
52 - 56	Curva bilateral semilandmarks	III	Curva hecha con 5 puntos que delinear el maxilar. Se parte del landmark 24 y se llega al 28. Y del landmark 24 al 29.

Evaluación del error intra-observador

La precisión del marcaje de landmarks se evaluó mediante un análisis de error intra-observador, a partir de la repetición de la digitalización en tres sesiones independientes. En el tejido blando facial, el ANOVA mostró que el efecto del día de marcaje no fue significativo ($R^2=0.002$; $p=0.301$), mientras que el factor individuo explicó el 98% de la variación observada ($R^2=0.98$; $p=0.001$). En el esqueleto craneofacial, el efecto del día tampoco fue significativo ($R^2=0.0007$; $p=0.524$), y el factor individuo explicó la mayor parte de la variación ($R^2=0.9918$; $p=0.001$). Estos resultados indican que la variación observada se debe principalmente a diferencias reales entre individuos y no al error de digitalización. No se realizó

evaluación inter-observador, ya que todo el marcaje fue efectuado por una sola observadora.

Morfometría geométrica y análisis estadístico multivariado

Los análisis se realizaron en R utilizando el paquete Geomorph (Adams et al., 2024). Con el fin de enfocarse en el componente simétrico de la variación, las configuraciones de landmarks fueron simetrizadas previamente, eliminando la asimetría bilateral y conservando únicamente el componente simétrico para los análisis posteriores. A partir de estas configuraciones simetrizadas se aplicó, para cada tejido, un Análisis Generalizado de Procrustes (GPA) —traslación, escalamiento y rotación— para obtener coordenadas de Procrustes comparables entre

individuos (Zelditch, Swiderski y Sheets, 2012; Bookstein, 2018); el procedimiento se ejecutó con 1000 iteraciones hacia la configuración de consenso. Posteriormente, las coordenadas de Procrustes se analizaron mediante Análisis de Componentes Principales (PCA) para identificar los principales ejes de variación de forma en cada tejido. Finalmente, se realizaron regresiones lineales de la forma sobre el tamaño del centroide, por separado para el tejido blando facial y el esqueleto craneofacial, con el fin de evaluar el componente alométrico y estimar la influencia del tamaño en los patrones morfológicos observados (Mitteroecker et al., 2013). Los análisis se efectuaron en el paquete geomorph de R, a partir de las coordenadas de Procrustes mediante la función *procD.lm*. La significancia de los modelos se evaluó mediante pruebas de permutación con 1000 iteraciones.

Resultados

Variación de la forma del tejido blando facial

El PCA mostró que PC1 y PC2 explicaron el 17.67% y el 13.77% de la variación de la forma, respectivamente (Figura 3). La dispersión de los individuos fue heterogénea respecto al sexo. En la

misma figura, los wireframes faciales muestran los principales cambios morfológicos asociados a cada eje:

-PC1 máximo: configuración compatible con mayor proyección del tercio superior, prominencia supraorbitaria y ligera elevación de la región ceja-párpado. En perfil, la nariz se observa más proyectada, como mayor abertura alar; el filtrum aparece relativamente más corto/estrecho. Los labios se muestran más prominentes y mentón más redondeado.

-PC1 mínimo: configuración caracterizada por retracción relativa del frontal, estrechamiento del complejo supraorbitario y descenso del tejido en la región infraorbitaria. Se aprecia ptosis de la punta nasal; el filtrum tiende a ensancharse y a ser más convexo. Los labios aparecen más delgados y el mentón relativamente reducido.

-PC2 máximo: configuración con elevación relativa de cejas y párpados, nariz con punta más elevada y alas nasales estrechas; el filtrum se estrecha. Labios más voluminosos y mentón más retraído.

-PC2 mínimo: configuración con descenso marcado de la región palpebral y del contorno infraorbitario. Se observa retracción del maxilar con incremento de la proyección mandibular. Ensamblamiento alar y descenso de la punta nasal. Los labios se afinan con descenso en las comisuras.

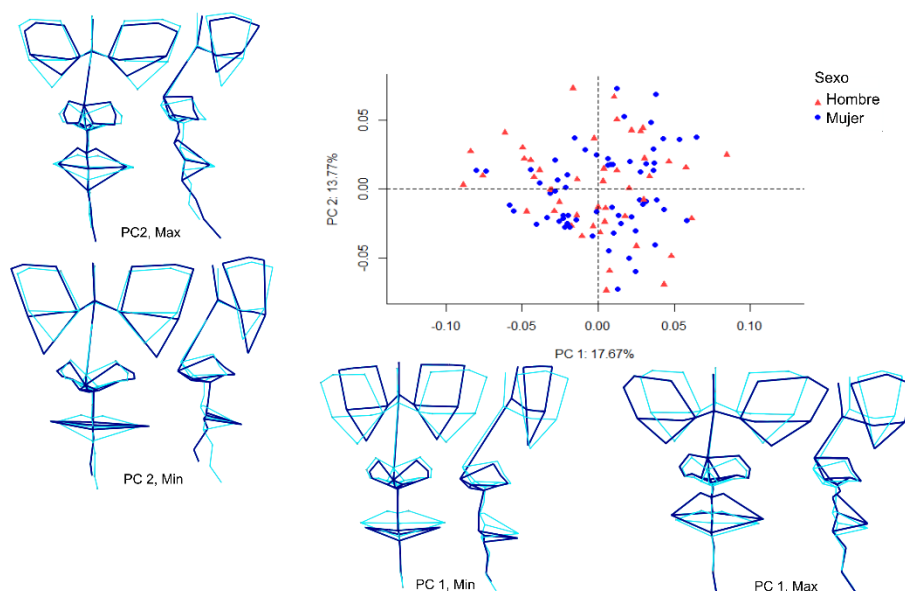


Figura 3. Análisis de Componentes Principales (PCA) de la forma del tejido blando facial. Dispersión de individuos en PC1 (17.67%) y PC2 (13.77%), codificados por sexo. Los wireframes ilustran la deformación de la configuración promedio (turquesa) hacia los extremos de PC1 y PC2 (azul). En PC1, se reflejan cambios principalmente en región frontal-periorbitaria, nasal y perioral (proyección del tercio superior, ptosis de punta nasal y adelgazamiento labial). En PC2, se capturan variación adicional en región palpebral/infraorbitaria y nasal, con cambios concomitantes en la región perioral.

Alometría, sexo y edad en la forma del tejido blando facial

La regresión de la forma sobre el tamaño mostró un efecto significativo, aunque de baja magnitud ($R^2=0.05$, $F=5.7$ y $p=0.001$) (Figura 4). La incorporación del sexo evidenció un efecto adicional significativo ($R^2=0.02$, $F=2.8$ y $p=0.003$), mientras que la interacción tamaño x sexo no fue significativa ($R^2=0.01$, $F=1.3$ y $p=0.137$). Al incluir la edad junto con el tamaño, la edad se asoció significativamente con la variación de la forma ($R^2=0.09$, $F=11.3$ y $p=0.001$) (Figura 5), mientras que la interacción tamaño x edad no fue significativa ($R^2=0.00$, $F=1.0$ y $p=0.414$). En comparación con el tamaño, la edad mostró un efecto con mayor proporción de varianza explicada ($R^2=0.09$ vs. 0.05). En conjunto, estos resultados apoyan efectos independientes de tamaño, sexo y edad sobre la forma facial.

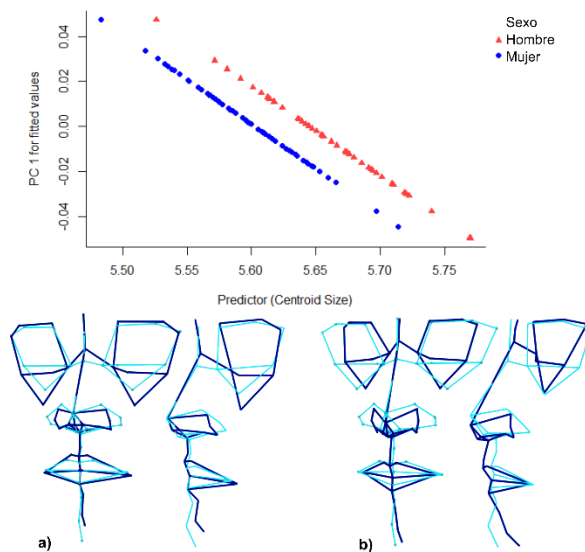


Figura 4. Alometría del rostro. Relación entre los valores ajustados de PC1 y el tamaño del centroide, con puntos codificados por sexo. La pendiente negativa indica un gradiente alométrico significativo ($R^2=0.05$ $p=0.001$). (a) Wireframes asociado al extremo de menor tamaño: configuración con cambios relativos en región orbitaria, nasal y perioral. (b) Wireframe asociado al extremo de mayor tamaño: configuración contrastante con modificaciones relativas en las mismas regiones (las líneas turquesa representan la forma promedio).

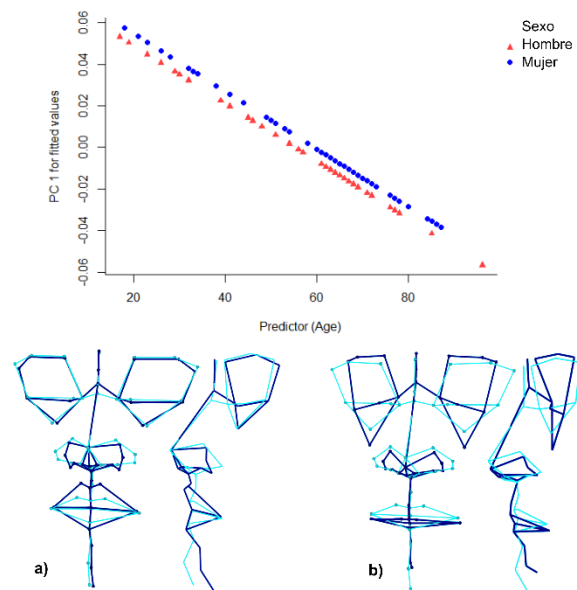


Figura 5. Forma y la edad del tejido blando facial. Relación entre los valores ajustados y la edad (predictor), con puntos codificados por sexo. (a) Wireframe asociado al extremo menor de edad: configuración con rasgos relativamente juveniles en región periorbitaria, nasal y perioral. (b) Wireframe asociado al extremo de mayor edad mostró ptosis palpebral, descenso infraorbitario, ptosis de la punta nasal, elongación del filtrum y adelgazamiento labial (las líneas turquesa representan la forma promedio).

Variación de la forma craneofacial

En el PCA de las coordenadas craneofaciales, PC1 explicó el 19.36% y PC2 el 12.64% de la variación de la forma. En la Figura 6, la dispersión de los individuos presentó una superposición amplia entre mujeres y hombres. Los wireframes faciales asociados a los extremos de PC1 y PC2 describen los cambios morfológicos predominantes (Figura 6):

-PC1 máximo: mayor proyección del frontal en región supraciliar y expansión lateral de la región orbitaria. Huesos nasales más elongados e inclinados inferiormente; abertura piriforme relativamente más amplia y reducción relativa de la espina nasal anterior. Retracción y acortamiento del maxilar, con cambios en la región ectomolar. Aumento relativo de la proyección de la sínfisis mandibular.

-PC1 mínimo: retracción frontal y constricción de la región orbitaria hacia la línea media. Huesos nasales más cortos y elevados; abertura piriforme relativamente más estrecha, mayor proyección relativa del maxilar y retrusión/descenso de la mandíbula.

-PC2 máximo: protrusión frontal con reducción relativa del contorno orbitario. Huesos nasales acortados; base de la abertura nasal más alargada y estrecha. Retracción maxilar y aumento relativo del prognatismo mandibular.

-PC2 mínimo: retracción frontal con expansión supero lateral e inferior de la región orbitaria. Huesos nasales elongados; menor proyección relativa de la espina nasal anterior. Maxilar más estrecho y alargado y retrusión mandibular.

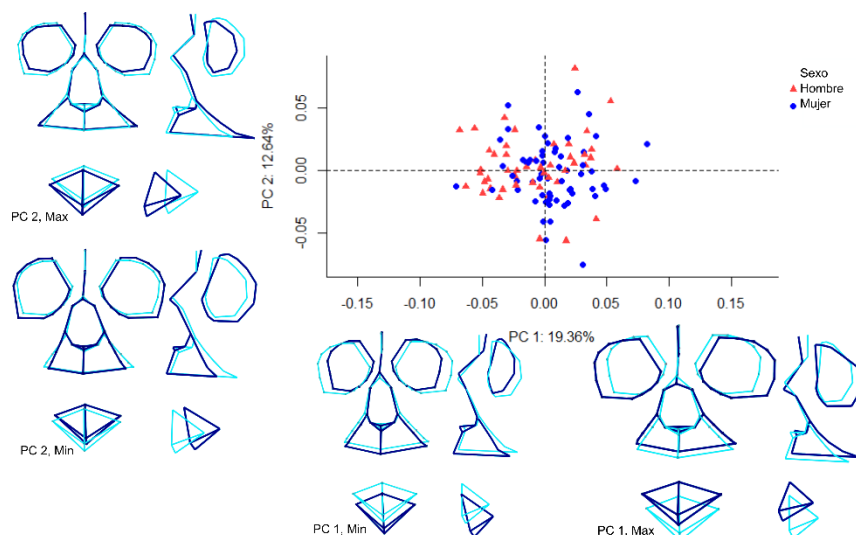


Figura 6. PCA del esqueleto craneofacial. Dispersión de individuos en PC1 (19.36%) y PC2 (12.64%), codificados por sexo. Los wireframes muestran la deformación desde la configuración promedio (turquesa) hacia los extremos de cada componente (azul). Los cambios morfológicos predominantes se observan en la región frontal-orbitaria, nasal y maxilomandibular.

Alometría, sexo y edad en la forma craneofacial

La regresión de la forma craneofacial sobre el tamaño mostró un efecto significativo, aunque de baja magnitud ($R^2 = 0.06$, $F=7.4$, $p=0.001$). En el modelo múltiple, el efecto principal del sexo no fue significativo ($R^2=0.01$, $F=7.4$, $p=0.074$). En contraste, la interacción tamaño x sexo fue significativa ($R^2=0.02$, $F=2$, $p=0.033$; ver Figura 7), lo que sugiere que la relación alométrica entre tamaño y forma difiere entre mujeres y hombres.

Al incorporar la edad junto con el tamaño, la edad mostró un efecto significativo sobre la forma ($R^2=0.03$, $F=3.3$, $p=0.001$). En la descripción del cambio de forma los wireframes del extremo de mayor edad se aprecia expansión relativa del borde inferior orbitario, elongación/depresión de huesos nasales, ampliación lateral de la abertura piriforme, menor proyección relativa de la espina nasal anterior y retracción maxilar (Figura 8). Sin embargo, la interacción tamaño x edad no fue significativa ($R^2=0.01$, $F=1.3$, $p=0.174$). En conjunto, los resultados indican efectos modestos del tamaño y la edad sobre la

forma craneofacial y sugieren alometría dependiente del sexo.

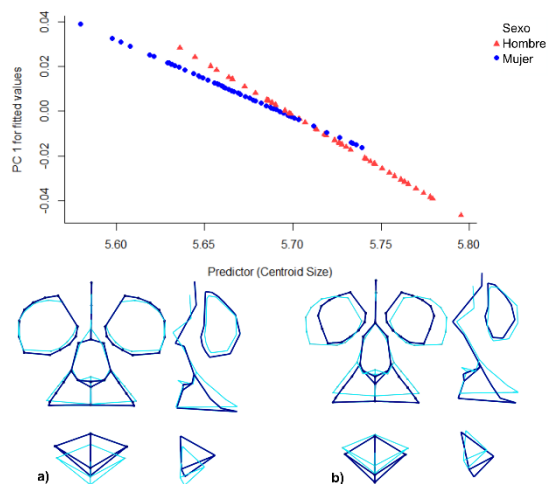


Figura 7. Alometría del esqueleto craneofacial. Relación entre los valores ajustados de PC1 y tamaño del centroide por sexo. La interacción tamaño x sexo fue significativa ($p=0.033$) consistente con el cruce de pendientes entre grupos. Los wireframes muestran la deformación desde la configuración promedio (turquesa) hacia los extremos (azul) de menor (a) y mayor tamaño (b), con cambios concentrados en regiones orbitarias, nasales y maxilomandibulares.

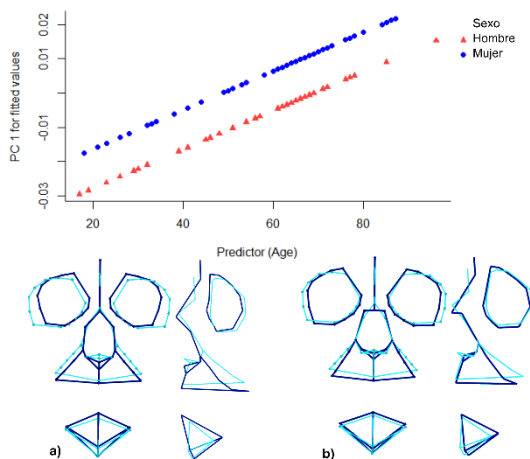


Figura 8. Forma y edad del esqueleto craneofacial. Relación entre los valores ajustados y la edad (predictor), con puntos codificados por sexo. La edad explicó una proporción pequeña pero significativa de la forma ($p=0.001$). Los wireframes muestran la deformación desde la forma promedio (turquesa) hacia los extremos de menor (a) y mayor edad (b) (azul), con cambios predominantes en contorno orbitario, región nasal y maxilar.

Discusión

En general, este estudio muestra que la forma del rostro y del esqueleto craneofacial en adultos se asocia con la edad y, en menor medida, con el tamaño (alometría). En el tejido blando facial, la edad explicó una proporción mayor de la variación que el tamaño, lo que sugiere que el envejecimiento facial implica reorganizaciones morfológicas que no pueden atribuirse únicamente a diferencias de escala. En el esqueleto craneofacial, además del efecto del tamaño, se detectó evidencia de que la relación tamaño-forma varía según el sexo, mientras que el efecto de la edad fue significativo, aunque de magnitud menor que en el tejido blando. En términos generales, los patrones descritos en ambos niveles tisulares aportan una base cuantitativa para avanzar en la caracterización morfológica del envejecimiento y en la identificación de rasgos potencialmente útiles para la estimación de edad en adultos.

Envejecimiento y cambios de forma en el tejido blando facial

Los cambios asociados con la edad en el rostro se concentraron en regiones periorbitarias, nasales y periorales, tal como sugieren los wireframes. Este

patrón es coherente con descripciones ampliamente reportadas del envejecimiento facial, según las cuales la disminución de colágeno, la pérdida de elasticidad, el adelgazamiento cutáneo, la redistribución del tejido adiposo y la acción de la gravedad contribuyen a ptosis palpebral, el descenso infraorbitario, las modificaciones del filtrum y el adelgazamiento labial (Pessa et al., 1998, 2008; Levine et al., 2003; Rohrich y Pessa, 2007; Levine, 2008; Rohrich et al., 2009; Imai y Okami, 2019; Windhager et al., 2019). Desde una perspectiva morfométrica, nuestros resultados son relevantes porque capturan dichos cambios como transformaciones integradas de configuración tridimensional, en lugar de depender de medidas lineales aisladas o de aproximaciones bidimensionales. Aunque el tamaño tuvo un efecto significativo sobre la forma facial, su contribución fue reducida. Esto indica que, si bien existe un componente alométrico en la morfología facial adulta, los rasgos asociados con la edad no se reducen a cambios de escala. En otras palabras, la señal de envejecimiento detectada en el tejido blando facial parece reflejar transformaciones estructurales y redistribuciones tisulares que modifican la forma más allá del tamaño global.

Envejecimiento y remodelación del esqueleto craneofacial

En el esqueleto craneofacial, los cambios observados en la región orbitaria, el maxilar y la abertura piriforme concuerdan con la propuesta de que el envejecimiento óseo incluye procesos de remodelación regional incluso en individuos dentados. Diversos autores han señalado que la retrusión maxilar y la modificación de áreas como las órbitas y la abertura piriforme no pueden explicarse únicamente por edentulismo, sino que reflejan procesos de reabsorción y remodelación asociados con la edad (Pessa et al., 1998, 1999, 2008; Mendelson et al., 2007; Shaw y Kahn, 2007; Shaw et al., 2011; Mendelson y Wong, 2012). En este sentido, nuestros hallazgos son compatibles con esa literatura, ya que documentan cambios de forma craneofacial que involucran precisamente estas regiones y que coexisten con transformaciones en el tejido blando.

Al mismo tiempo, el efecto de la edad sobre la forma craneofacial fue significativo, aunque pequeño. Esta magnitud moderada puede interpretarse de al

menos dos maneras no excluyentes: por un lado, parte de la variación ósea relevante podría ocurrir sutilmente durante la adultez; por otro lado, la heterogeneidad interindividual puede diluir la proporción de varianza atribuible exclusivamente a la edad. Esto refuerza la necesidad de incorporar en futuros análisis covariables que modulan la morfología ósea en adultos, como la condición dental detallada, el índice de masa corporal (IMC), factores hormonales o antecedentes clínicos.

Alometría y dimorfismo sexual en el PCA

En ambos tejidos, el PCA no mostró una separación marcada por sexo en los primeros componentes. Esto no implica necesariamente ausencia de dimorfismo sexual, sino que sugiere que los ejes de mayor varianza están dominados por otras fuentes de variación, como la edad, el tamaño y la variación interindividual de la forma. Los modelos lineales, en cambio, permiten evaluar efectos más específicos una vez controlado el tamaño, lo que ayuda a explicar por qué el sexo no domina el PCA, pero sí puede contribuir en los análisis de regresión.

Un resultado particularmente informativo fue la interacción significativa tamaño $\times$ sexo en el esqueleto craneofacial, consistente con pendientes alométricas diferentes entre mujeres y hombres; es decir, el efecto del tamaño sobre la forma craneofacial no es idéntico entre sexos. Desde una perspectiva biológica, esto podría reflejar diferencias sexuales en la arquitectura craneofacial adulta o en los procesos de remodelación tardía, lo que sugiere que los mecanismos de mantenimiento y cambio no operan de manera equivalente en ambos sexos. Por su parte, la ausencia de una interacción tamaño $\times$ edad indica que, en esta muestra, no se detectaron cambios sistemáticos en la pendiente alométrica a lo largo del gradiente etario analizado.

Aportación del estudio e implicaciones para la antropología forense

La principal aportación de este trabajo radica en la evaluación paralela del envejecimiento morfológico del tejido blando facial y del esqueleto craneofacial en los mismos individuos, mediante morfometría geométrica tridimensional aplicada a modelos derivados de tomografías computarizadas.

Esta aproximación reduce la dependencia de mediciones lineales en dos dimensiones y permite caracterizar cambios complejos de forma en estructuras inherentemente tridimensionales. Además, el estudio aporta evidencia en una muestra adulta mexicana, lo que contribuye a ampliar el panorama poblacional de un campo en el que ciertas poblaciones suelen estar subrepresentadas.

Estos hallazgos también tienen implicaciones para la antropología forense. Aunque los patrones identificados no constituyen por sí mismos un método de estimación de edad, si aportan una base cuantitativa para reconocer cambios morfológicos sensibles a la edad en individuos adultos, un grupo etario en el que la estimación cronológica sigue siendo especialmente compleja. En este sentido, la integración de tejido blando facial y esqueleto craneofacial en los mismos individuos ofrece una perspectiva prometedora para futuras aplicaciones en estimación de edad e identificación humana, en consonancia con la relevancia que el envejecimiento craneofacial ha adquirido en la literatura forense (Albert, Ricanek y Patterson, 2007).

Limitaciones

Este estudio es transversal; por tanto, describe patrones poblacionales y no trayectorias longitudinales de cambio individual. En consecuencia, los resultados permiten identificar asociaciones entre edad y forma, pero no establecer la secuencia temporal ni la velocidad con que ocurren estas transformaciones a lo largo del envejecimiento. Además, no se incorporaron covariables potencialmente relevantes como el IMC, el estado dental o factores clínicos, los cuales podrían influir en la magnitud y expresión de los cambios observados. Por ello, estas limitaciones deben considerarse al interpretar el alcance de los efectos detectados y al extrapolar los hallazgos a otras muestras o contextos de aplicación.

Implicaciones y direcciones futuras

En términos aplicados, los patrones cuantificados ofrecen candidatos a marcadores morfológicos para estimación de edad en adultos; no obstante, su utilidad predictiva debe evaluarse mediante validación cruzada y de ser posible con

muestras externas. Como siguiente paso, será especialmente informativo incorporar análisis de modularidad e integración morfológica para determinar si los cambios en tejido blando y en esqueleto craneofacial están acoplados o si siguen trayectorias parcialmente independientes a lo largo de la adultez. Una hipótesis plausible es que ciertos módulos (p.ej., periorbitario-nasal y perioral) concentran mayor señal de envejecimiento en el tejido blando, mientras que en el cráneo las regiones orbitonasal y maxilar contribuyen de manera diferencial; y que el grado de acoplamiento entre ambos niveles tisulares varía con el sexo y la edad. Evaluar esta hipótesis permitirá refinar la interpretación biológica de los cambios y fortalecer el desarrollo de enfoques morfométricos para la estimación de edad craneofacial.

Implicaciones y perspectivas futuras

En conjunto, la edad se asoció significativamente con la variación de la forma tanto en el tejido blando facial como en el esqueleto craneofacial, con cambios direccionales concentrados en regiones periorbitarias y nasales, además de modificaciones maxilares en el tejido óseo. El tamaño mostró asociaciones significativas, pero de baja magnitud, lo que sugiere que el envejecimiento facial no se explica únicamente por efectos de escala. Aunque el sexo no dominó los principales ejes de variación, en el esqueleto craneofacial se observó evidencia de alometría dependiente del sexo. Estos hallazgos aportan una base morfométrica tridimensional para proponer indicadores de forma orientados a la estimación de edad en adultos. Futuros análisis de integración y modularidad permitirán precisar el grado de acoplamiento entre tejidos.

Agradecimientos

Agradecemos al Dr. Leopoldo A. Becerra por facilitar el acceso a las TC provenientes de la clínica privada CB Dental y al Dr. Juan Alberto Méndez por permitirnos acceder a las TC del Hospital General de Zacatecas. Asimismo, agradecemos al Posgrado en Antropología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por el apoyo institucional brindado.

Financiación

Este trabajo fue financiado con la beca Posgrados Nacionales de Calidad que otorga el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Referencias bibliográficas

- Adams D., Collyer M., Kaliontzopoulou A., Baken E. (2024). Geomorph: Software for geometric morphometric analyses (4.0.7).
- Albert A.M., Ricanek K., Patterson E. (2007). A review of the literature on the aging adult skull and face: Implications for forensic science research and applications. *Forensic Sci Int* 172(1): 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2007.03.015>
- Bartlett S.P., Grossman R., Whitaker L.A. (1992). Age-related changes of the craniofacial skeleton: an anthropometric and histologic analysis. *Plast Reconstr Surg* 90(4): 592–600. <https://doi.org/10.1097/00006534-199210000-00007>
- Bookstein F.L. (2018). *A Course in Morphometrics for Biologists*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108120418>
- Cawood J.I., Howell R.A. (1988). A classification of the edentulous jaws. *Int J Oral Maxillofac Surg* 17(4): 232–236. [https://doi.org/10.1016/S0901-5027\(88\)80047-X](https://doi.org/10.1016/S0901-5027(88)80047-X)
- Fedorov A., Beichel R., Kalpathy-Cramer J., Finet J., Fillion-Robin J.-C., Pujol S., et al. (2012). 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Mag Reson Imaging* 30(9): 1323–1341. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2012.05.001>
- Imai T., Okami K. (2019). Facial cues to age perception using three-dimensional analysis. *PLOS ONE* 14(2): e0209639. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209639>
- Kahn D.M., Shaw R.B. (2008). Aging of the Bony Orbit: A Three-Dimensional Computed Tomographic Study. *Aesthet Surg J* 28(3): 258–264. https://doi.org/10.1016/J.ASJ.2008.02.007/2/10.1016_J.ASJ.2008.02.007
- Levine R.A. (2008). Aging of the midface bony elements. *Plast Reconstr Surg* 121(2): 698–699. <https://doi.org/10.1097/01.PRS.0000294951.48009.E2>
- Levine R.A., Garza J.R., Wang P.T.H., Hurst C.L., Dev V.R. (2003). Adult Facial Growth: Applications to Aesthetic Surgery. *Aesthet Plast Surg* 27(4): 265–268. <https://doi.org/10.1007/S00266-003-2112-4>
- 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. *Am J Orthod*

- Dentofac Orthop 143(6): 845–854. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2013.01.019>
- Mendelson B.C., Hartley W., Scott M., McNab A., Granzow J.W. (2007). Age-related changes of the orbit and midcheek and the implications for facial rejuvenation. *Aesthet Plast Surg* 31(5): 419–423. <https://doi.org/10.1007/S00266-006-0120-X>
- Mendelson B.C., Wong C.H. (2012). Changes in the facial skeleton with aging: Implications and clinical applications in facial rejuvenation. *Aesthet Plast Surg* 36(4): 753–760. <https://doi.org/10.1007/S00266-012-9904-3>
- 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>
- Parker S. (2007). *El cuerpo humano*. London (UK): Dorling Kindersley.
- Pessa J.E., Slice D.E., Hanz K.R., Broadbent T.H., Rohrich R.J. (2008). Aging and the shape of the mandible. *Plast Reconstr Surg* 121(1): 196–200. <https://doi.org/10.1097/01.PRS.0000293864.94138.AE>
- Pessa J.E., Zadoo V.P., Mutimer K.L., Haffner C.D., Yuan C., DeWitt A.I., Garza J.R. (1998). Relative Maxillary Retrusion as a Natural Consequence of Aging: Combining Skeletal and Soft-Tissue Changes into an Integrated Model of Midfacial Aging. *Plast Reconstr Surg* 102(1): 205–212.
- Pessa J.E., Zadoo V.P., Yuan C., Ayedelotte J.D., Cuellar F.J., Cochran S.C., Mutimer K.L., Garza J.R. (1999). Concertina Effect and Facial Aging: Nonlinear Aspects of Youthfulness and Skeletal Remodeling, and Why, Perhaps, Infants Have Jowls. *Plast Reconstr Surg* 103(2): 635–644.
- Premkumar S. (2011). *Textbook of Craniofacial Growth*. London (UK): Jaypee Brothers Medical Publishers. <https://doi.org/10.5005/jp/books/11294>
- Rohrich R.J., Arbique G.M., Wong C., Brown S., Pessa J.E. (2009). The Anatomy of Suborbicularis Fat: Implications for Periorbital Rejuvenation. *Plast Reconstr Surg* 124(3): 946–951. <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e3181b17b76>
- Rohrich R.J., Pessa J.E. (2007). The fat compartments of the face: Anatomy and clinical implications for cosmetic surgery. *Plast Reconstr Surg* 119(7): 2219–2227. <https://doi.org/10.1097/01.PRS.0000265403.66886.54>
- Shaw R.B., Kahn, D.M. (2007). Aging of the midface bony elements: A three-dimensional computed tomographic study. *Plast Reconstr Surg* 119(2): 675–681. <https://doi.org/10.1097/01.PRS.0000246596.79795.A8>
- Shaw R.B., Katzel E.B., Koltz P.F., Yaremchuk M.J., Giroto J.A., Kahn D.M., Langstein, H.N. (2011). Aging of the Facial Skeleton: Aesthetic Implications and Rejuvenation Strategies. *Plast Reconstr Surg* 127(1): 374–383. <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e3181f95b2d>
- Windhager S., Mitteroecker P., Rupić I., Lauc T., Polašek O., Schaefer K. (2019). Facial aging trajectories: A common shape pattern in male and female faces is disrupted after menopause. *Am J Phys Anthropol* 167: 678–688. <https://doi.org/10.1002/AJPA.23878>
- Zelditch M., Swiderski D.L., Sheets H.D. (2012). *Geometric morphometrics for biologists: a primer*. New York and London: Elsevier Academic Press.