



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE ODONTOLÓGÍA
DEPARTAMENTO DE PREGRADO
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ODONTOLÓGICAS
ÁREA DE ANATOMÍA
CENTRO DE ANÁLISIS CUANTITATIVO EN ANTROPOLOGÍA DENTAL

**DIFERENCIAS EN LA RESPUESTA MECÁNICA MANDIBULAR DE
INDIVIDUOS QUE EJERCEN CARGAS MASTICATORIAS DE DISTINTO TIPO E
INTENSIDAD. ESTUDIO MEDIANTE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS**

Carla Andrea Caorsi Pizarro

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
CIRUJANO-DENTISTA

TUTOR PRINCIPAL
Dra. Viviana Toro-Ibacache

Adscrito a Proyecto FONDECYT 11150175
Santiago, Chile
2018



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE ODONTOLÓGÍA
DEPARTAMENTO DE PREGRADO
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ODONTOLÓGICAS
ÁREA DE ANATOMÍA
CENTRO DE ANÁLISIS CUANTITATIVO EN ANTROPOLOGÍA DENTAL

**DIFERENCIAS EN LA RESPUESTA MECÁNICA MANDIBULAR DE
INDIVIDUOS QUE EJERCEN CARGAS MASTICATORIAS DE DISTINTO TIPO E
INTENSIDAD. ESTUDIO MEDIANTE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS**

Carla Andrea Caorsi Pizarro

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
CIRUJANO-DENTISTA

TUTOR PRINCIPAL

Dra. Viviana Toro-Ibacache

Adscrito a Proyecto FONDECYT 11150175
Santiago, Chile
2018

Agradecimientos

*A mi Familia, el Pa, la Ma y Catalina,
Gracias por darme tanto. Nada habría sido posible si no fuera por ustedes, se los debo todo. Gracias por estar siempre, y por haber creído en cada uno de mis proyectos. Gracias por inculcarme el esfuerzo y la perseverancia que aquí dieron frutos.*

A Sebastián, por haber hecho que todo valga la pena. Nada habría sido lo que fue sin ti... eres lo mejor que gané aquí. Grazie per l' aiuto, Grazie di tutto.

A mis abuelos, que se alegran siempre por mis logros.

A mis amigos, gracias por estar, por las risas y el apoyo.

A mi tutora, Viviana Toro, la mejor guía que alguien podría pedir. Gracias por la paciencia, las enseñanzas, el estímulo y la dedicación; por ser tan cercana y cálida. Gracias por haber hecho que este proceso haya sido una de las mejores experiencias de todo mi recorrido universitario.

Al profesor Germán Manríquez, por haberme hecho sentir parte del CA2, por su buena disposición y por tener una forma distinta de ver las cosas que cambia la perspectiva.

A todos los integrantes del CA2, agradezco su compañerismo y su apoyo, y sobre todo gracias a Pame y Trini, con quienes compartí esta etapa, y a Francisca, mi "tutora asociada", gracias por jamás dudar en darme ayuda y por haber hecho de ésta una misión conjunta.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. RESUMEN	1
2. MARCO TEÓRICO	2
2.1. Introducción	2
2.2. Embriología, Crecimiento y Desarrollo	3
2.2.1 <i>Etapa Prenatal</i>	3
2.2.2 <i>Etapa Postnatal</i>	5
2.3. Anatomía Mandibular	10
2.4. Masticación	12
2.4.1 <i>Función Masticatoria y Movimiento Mandibular durante la masticación</i>	12
2.4.2 <i>Músculos de la Masticación</i>	17
2.4.3 <i>Morfología Funcional Mandibular: relación de la dieta con la anatomía ósea mandibular</i>	20
2.5. Mecanotransducción	22
2.6. Análisis de Elementos Finitos	25
3. HIPÓTESIS	28
4. OBJETIVO GENERAL	29
5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
6. MATERIALES Y MÉTODOS	29
6.1. Muestra	30
6.2. Reconstrucción Tridimensional	32
6.3. Análisis de Elementos Finitos	33
7. RESULTADOS	35
7.1. Escenario de Incisión: carga en los incisivos centrales inferiores	36
7.2. Escenario de Masticación: carga en el primer molar inferior izquierdo	39
8. DISCUSIÓN	42
9. CONCLUSIONES	49
10. BIBLIOGRAFÍA	50
11. ANEXOS	59

1. RESUMEN

Introducción: Las características morfológicas óseas de la especie humana han variado durante su historia, generando cambios que le han permitido adaptarse al entorno según los requerimientos funcionales exigidos. Un aspecto en el que se ha observado gran adaptación es la morfología mandibular y oclusión dental, probablemente en respuesta al cambio en las cargas masticatorias demandadas por las distintas estrategias de vida, pasando desde una alimentación basada en alimentos duros, a comidas blandas. Nuestro propósito fue evaluar la respuesta mecánica de mandíbulas de individuos con carga masticatoria y relación máxilomandibular distintas, para conocer el efecto de estas diferencias en su morfología mandibular.

Material y método: Se seleccionaron cinco individuos representativos de poblaciones arqueológicas y actuales que difieren en la consistencia de sus dietas y relación máxilomandibular: uno con carga masticatoria intensa, otro moderada, uno con carga leve y dos con relación máxilomandibular alterada (clase II y III esquelética). Con sus tomografías computarizadas, se construyeron modelos digitales tridimensionales, que fueron transformados a mallas de elementos finitos y sometidos a cargas masticatorias simuladas. Los resultados que mostraron la cantidad y distribución de microdeformaciones producidas en cada individuo, fueron analizados mediante mapas de contornos de colores.

Resultados: La respuesta mecánica mostró mayores diferencias en magnitud que en distribución de microdeformaciones, que sobresalieron en el individuo de carga moderada y de relación máxilomandibular de clase II, más distanciados del resto. Las diferencias en la ubicación fueron más notorias entre el grupo de individuos de dieta blanda, versus los individuos de dieta moderada y dura, más similares entre sí.

Conclusión: La respuesta mecánica es similar entre individuos. Aquellas mandíbulas más gráciles sin embargo sufren mayores magnitudes de microdeformación, las cuales corresponden principalmente a mandíbulas clase I actuales y clase II.

Palabras Clave: *Mandíbula, Carga Masticatoria, Relación Máxilomandibular, Microdeformaciones, Análisis de Elementos Finitos*

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

A lo largo de la historia, la especie humana se ha enfrentado a grandes transformaciones que han tocado cada ámbito de su vida y desarrollo. Cambios de índole biológica, genética, ambiental, así como también fenómenos sociales e individuales, se han sumado para originar nuevos escenarios a los que el hombre ha debido adaptarse. Los grupos humanos que han poblado la Tierra en sus distintas épocas y geografías se han visto enfrentados a desafíos diferentes para lograr la subsistencia, y los cambios que han tenido que sufrir para desarrollarse en los distintos medios han dejado una huella en su desarrollo físico. Las características de nuestros ancestros no son las mismas que tenemos los humanos modernos, y las disimilitudes se evidencian también al observar poblaciones simultáneas con estilos de vida distintos. Los nuevos requerimientos que han surgido con los cambios en los estilos de vida han marcado la adaptación de la especie, y un ejemplo de éstos es la evolución morfológica del esqueleto óseo, un proceso que representa interés en el campo de la odontología y la antropología física.

Por una parte, sabemos que la conformación estructural de la mandíbula humana responde en gran medida a factores funcionales, ya que su forma varía considerablemente como efecto de la aplicación sostenida de cargas, gracias a su alta tasa de remodelación. Por otra parte, sabemos, en consecuencia con lo anterior, que las mandíbulas de individuos pertenecientes a poblaciones con un régimen alimenticio conformado principalmente por productos duros y resistentes, que requieren de grandes fuerzas masticatorias, presentan huesos faciales con mayores grados de robusticidad (Barbeito-Andrés et al., 2011; González-José et al., 2005; Paschetta et al., 2010), al contrario que aquellas en el otro extremo del espectro. Resulta entonces interesante preguntarse cómo responde mecánicamente el tejido óseo mandibular de personas que ejercen cargas masticatorias distintas -altas, moderadas y leves- o que difieren en cuanto a su tipo de relación máxilomandibular -relaciones de prognatismo, neutras o de retrognasia-, cuando se realizan movimientos y fuerzas de masticación. ¿Cómo se

comportan?, ¿las microdeformaciones que las afectan difieren en un caso u otro?, ¿estas posibles diferencias tienen injerencia en la susceptibilidad aumentada de ciertos individuos a desarrollar trastornos dentomaxilofaciales? Para comenzar a dar respuesta a las interrogantes, debemos comenzar por un completo entendimiento de las estructuras anatómicas que intervienen en estos procesos, el conocimiento de los procesos involucrados y las metodologías aplicadas en la investigación.

2.2. Embriología, crecimiento y desarrollo mandibular

Para llegar a una mandíbula madura en términos de crecimiento y desarrollo, como las que son objeto de estudio en esta investigación, el individuo debió atravesar distintas fases del crecimiento que determinaron el desarrollo de un cuerpo óseo adulto y adaptado a sus requerimientos funcionales. Comenzaremos por definir el proceso de crecimiento como un aumento de tamaño o masa de una estructura biológica, resultante de la multiplicación celular. Es el aspecto cuantitativo del desarrollo biológico, que enfatiza en los cambios dimensionales de las estructuras. El crecimiento puede resultar en el aumento o disminución de tamaño, cambios en la forma o las proporciones, complejidad y textura, entre otros. Por su parte, el desarrollo hace referencia al aspecto cualitativo, entendiéndose como la serie de sucesos entre los estadios iniciales de un cuerpo, hasta llegar a su condición adulta, abarcando los procesos de diferenciación que ocurren durante el crecimiento que permiten la forma final de un individuo o estructura. El desarrollo involucra procesos de cambios morfológicos, estructurales y funcionales, que se dan desde las primeras etapas embrionarias del individuo.

2.2.1 Etapa prenatal

Durante el desarrollo embrionario tienen lugar los fenómenos que darán origen a todas las estructuras del aparato estomatognático, incluidos la mandíbula y los músculos masticatorios (Sadler, 2011), así como también se inician los procesos de osificación de los huesos faciales. Todo comienza durante la cuarta semana de vida intrauterina (VIU), a partir de la cresta neural, desde donde migran hacia

anterior células ectomesenquimáticas que darán origen a los arcos faríngeos (Meruane et al., 2012; Parada et al., 2015). El primer arco faríngeo será específicamente el que de origen a la mandíbula mediante la fusión de dos prominencias maxilares que se forman en su porción inferior, que al unirse formarán el arco mandibular – además del labio inferior, el mentón y parte de las mejillas-, haciendo que entre la sexta y la séptima semana ya se pueden reconocer estructuras de la cara. Posteriormente, en este arco o proceso mandibular habrá células ectomesenquimáticas que se diferenciarán transformándose en condrocitos, que serán los que constituyan el Cartílago Mandibular de Meckel, que más adelante servirá como guía para la osificación (durante la séptima semana). La mandíbula será el segundo hueso del cuerpo en osificarse (Kjær et al., 2000), y lo hará a costa de dos mecanismos. El primero tendrá cabida en la zona donde luego estará el germen del canino y en la zona del ángulo mandibular ocurrirá una osificación de tipo membranosa, caracterizada por el paso directo de tejido mesenquimático a hueso. Ésta se iniciará alrededor del nervio mandibular y del nervio y arteria alveolar inferior, y se extenderá en todas las direcciones, incluyendo hacia superior, para poder dar cabida al desarrollo de los gérmenes dentarios. En el momento en que termine la formación del hueso alveolar, se completará la osificación de la mandíbula. Mientras tanto, al irse extendiendo el proceso de osificación hacia posterior, éste tendrá lugar también en la rama mandibular (Sperber et al., 2001). En este paso directo de un tejido a otro, el cartílago de Meckel sólo juega un rol de guía, similar a un andamiaje tisular que simplemente orienta la osificación. Este cartílago irá reabsorbiéndose a medida que avanza la osteogénesis y el proceso de osificación, a excepción de dos pequeños tramos que darán origen a huesecillos del oído medio y a ínfimos islotes en la superficie vestibular de la mandíbula (Kjær et al., 2000; Velayos, 2007).

El segundo mecanismo se dará en la zona de la sincondrosis mandibular, y será una osificación de tipo endocondral, en la que la estructura que se osifica es el cartílago que existe allí previamente (Moyers, 1992). Este cartílago previo es un cartílago secundario que se forma en los extremos del cartílago de Meckel, en el pericondrio, y que finalmente se irá transformando en hueso (Sadler, 2011).

Si bien el desarrollo embriológico de la mandíbula comienza tempranamente y ya con pocas semanas de VIU es posible distinguir las subestructuras que la

conformarán, su desarrollo se mantendrá durante toda la vida mediado por procesos de remodelación ósea, aun después de que haya acabado el desarrollo craneofacial del individuo marcado por el cierre de la sincondrosis esfeno-occipital, cerca de los 18 años (Rouvière, 1987).

Los procesos iniciales del desarrollo embriológico del aparato estomatognático y otras estructuras faciales se muestran en la Figura 1.

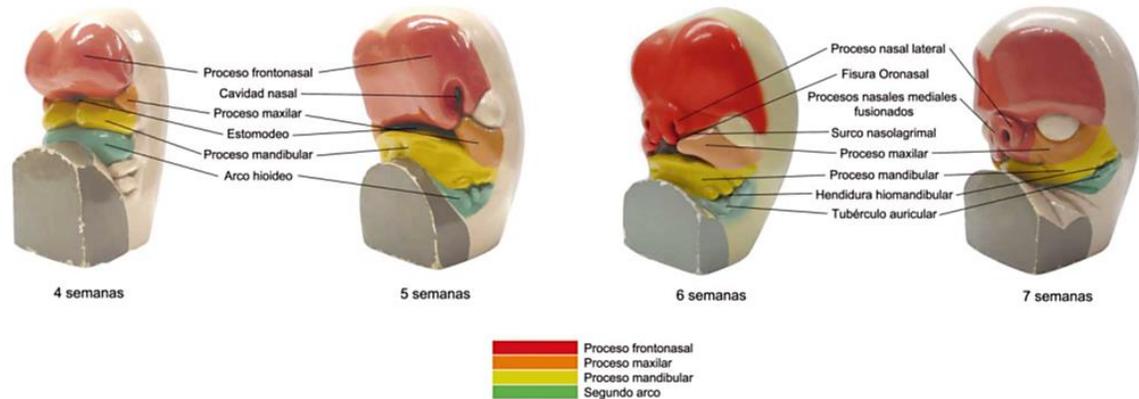


Figura 1. Desarrollo embriológico craneofacial inicial (modificado de Meruane et al., 2012)
Se observa desde una perspectiva oblicua la división y migración de los procesos que generarán las estructuras faciales, entre la cuarta y séptima semana de VIU.

2.2.2 Etapa postnatal

El crecimiento posnatal de la mandíbula se da mediante dos tipos de crecimiento óseo: el primero se denomina crecimiento cartilaginoso, fundamentalmente a nivel del cóndilo y también en la sínfisis mandibular que une las dos hemimandíbulas en la línea media anterior, y cuya relevancia en términos de crecimiento transversal es baja dado que la sínfisis se cierra tempranamente, entre el octavo y duodécimo mes de vida. El segundo tipo de crecimiento se denomina periostal-endostal, y es el que se da en la mayor parte de la mandíbula, siendo fundamental en el crecimiento total ya que cambia el tamaño y la forma tanto del cuerpo como de la rama mandibular a lo largo del desarrollo (Meikle, 2002; Nanci, 2013; Sperber, 2001).

El patrón general de crecimiento de la mandíbula es particularmente afectado por los procesos de remodelación, que ejercen la mayor parte del rol en el desarrollo, en un porcentaje mucho más alto que el de la mayoría de los huesos del cuerpo humano. Es por esta razón que se ha indicado que la mandíbula,

dentro del complejo cráneo facial, es el hueso con mayor plasticidad morfofuncional (Von Cramon-Taubadel, 2011). Si bien existe una secuencia ordenada de eventos dependiente de factores genéticos que se suceden para dar origen a una mandíbula morfológicamente madura, la influencia de factores ambientales podría ser clave, modificando incluso los ritmos de crecimiento del hueso en general y de sus distintas porciones en relación con las demás. El patrón de crecimiento de la mandíbula ha sido representado por algunos autores como W. R. Proffit (Proffit, 2005), bajo dos esquematizaciones que explican la dirección de crecimiento y el desplazamiento que sufre la mandíbula al aumentar su tamaño y desarrollarse: si se considera el cráneo como punto de referencia, puede decirse que el mentón se desplaza hacia abajo y hacia adelante, pero en datos obtenidos en experimentos de tinción vital se ha visto que el mentón es una zona de crecimiento casi inactiva. Por el contrario, la superficie posterior de la rama y los procesos condilar y coronoides son los principales puntos de crecimiento: el cuerpo de la mandíbula se alarga por aposición perióstica de hueso en su superficie posterior, mientras la rama crece en altura por aposición endocondral a nivel del proceso condilar, y por remodelación superficial. El proceso de crecimiento puede esquematizarse entonces, conceptualmente, como un proceso en el que la mandíbula se desplaza hacia adelante y abajo, mientras crece hacia arriba y atrás. Es un tipo de crecimiento llamado corrimiento cortical o deriva, en el que el hueso se mueve anteroinferiormente, acompañado por los tejidos blandos que lo rodean, y que en esencia permite que el cuerpo mandibular se alargue al alejarse la rama mandibular del mentón, gracias a una elevada actividad osteoclástica en la superficie anterior de la rama y una aún más aumentada actividad osteoblástica en la superficie posterior. Esto determina una proporción de reabsorción/aposición que no es equivalente, y que deriva en un desplazamiento óseo, sumado a cambios de tamaño y grosor. Lo anterior se esquematiza en la Figura 2, a continuación.

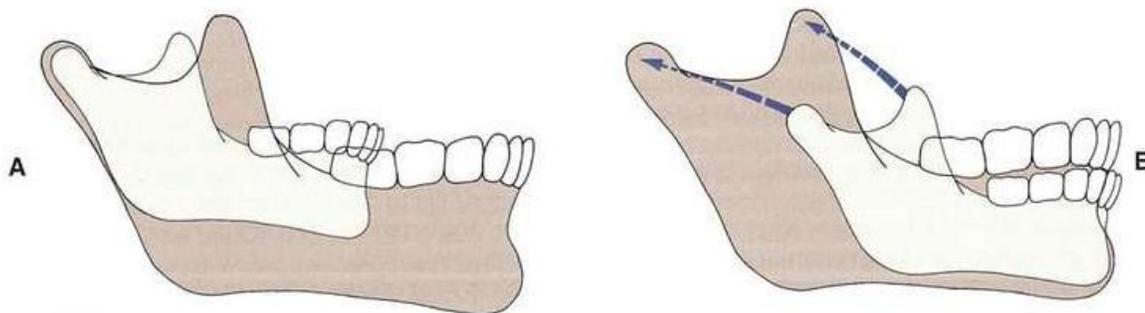


Figura 2. Esquematación del crecimiento mandibular (extraído de Proffit, 2005).

Se observa el desplazamiento mandibular durante el crecimiento. Se distinguen dos tipos de desplazamiento: *primario*, cuando el hueso crece en un extremo y por consiguiente el otro se aleja de él, y *secundario*, cuando el hueso se mueve por la acción de fuerzas ajenas.

a) Desplazamiento de la mandíbula hacia adelante y abajo, durante el proceso de crecimiento. Se observa la posición relativa del hueso entre el estado inicial y un estado maduro, con relación a la posición del cráneo.

b) Se muestra la dirección de crecimiento de la mandíbula con referencia a sí misma: pocos cambios ocurren a nivel mentoniano, mientras que el hueso crece hacia atrás y arriba determinado por sus centros de crecimiento.

Los diferentes mecanismos de crecimiento se combinan en las subestructuras mandibulares para componer el crecimiento global de la mandíbula, que se divide en unidades funcionales que determinan su desarrollo (Ugarte, 2017). Cada una de esas unidades funcionales está influenciada por una matriz funcional (Moss, 1968; Moss, 2007).

- Crecimiento del proceso condilar: es de tipo cartilaginoso. Se trata de un cartílago de tipo secundario, que pasa por una fase de tejido mesenquimático a tejido cartilaginoso y que no se forma en la etapa intrauterina como lo hacen los de la base del cráneo; este tejido cumple una función de sostén primaria, posterior a la cual se osifica. Este cartílago secundario actúa como un centro de crecimiento, lo que significa que es un campo de crecimiento de mayor actividad que el resto. Es un tejido adaptable a las presiones, en cuyo crecimiento es crucial la relación con el músculo pterigoideo lateral y el tejido ligamentoso retrocondíleo (Moss, 2007). Crece hacia atrás, arriba y afuera, produciendo un desplazamiento de la mandíbula hacia delante y abajo.
- Crecimiento de la rama: es el principal sitio de crecimiento mandibular postnatal, sumado al cartílago condilar y los rebordes alveolares, llevando a cabo el mayor porcentaje de crecimiento vertical, transversal y anteroposterior

de la mandíbula (Enlow, 1990). Ocurre a través de un proceso reabsortivo en el borde anterior y un incrementado proceso de aposición en el borde posterior, generando un aumento en su dimensión. Clínicamente se evidencia este fenómeno con la aparición del campo molar. Durante la lactancia, la rama ocupa la posición que ocupará el primer molar temporal cuando erupcione, lo que ejemplifica el gran fenómeno de remodelación que se da a este nivel (Figura 3). Este crecimiento de la rama hacia atrás y arriba condiciona un desplazamiento primario de la mandíbula hacia delante y abajo. Sumado a esto, la remodelación de las distintas zonas provee curvaturas y crecimiento vertical, como se muestra en la Figura 4.

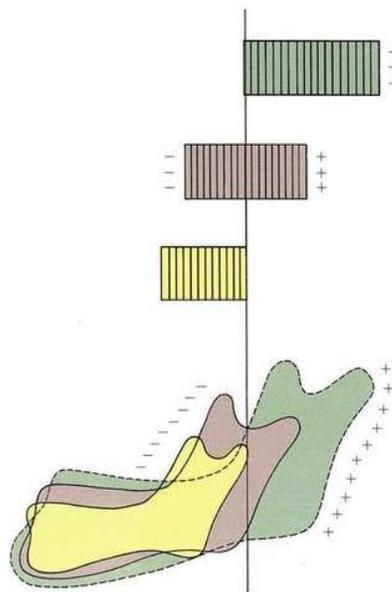


Figura 3. Remodelación de la rama mandibular (extraído de Proffit, 2005).

Debido al incremento en longitud que sufre la mandíbula por remodelación ósea de la rama durante el crecimiento, el hueso que en una etapa precoz conforma la punta del proceso condilar, puede haberse desplazado hasta conformar el borde anterior de la rama en una fase adulta.

- Crecimiento del cuerpo: Ocurre por aposición de tejido óseo en la cara exterior del cuerpo, hacia vestibular, mientras que en la cara interna se produce reabsorción. Otra zona donde existe crecimiento es en el área de la sínfisis mandibular, lo que determina la aparición del proceso mentoniano. En esta misma zona, pero más hacia superior, en el territorio comprendido entre el proceso mentoniano y el borde superior del hueso alveolar, se produce remodelamiento por reabsorción, específicamente en

hueso labial y zona incisiva, lo que contribuye a hacer más notoria la elevación del proceso mentoniano. A su vez, la sínfisis mandibular proporciona un desarrollo transversal que tiene lugar hasta aprox. los 8 meses de vida, por lo que, desde ese momento en adelante, el desarrollo transversal necesario para aumentar el espacio y facilitar la erupción de los dientes anteroinferiores definitivos, se deposita sobre los procesos de aposición y reabsorción (crecimiento endostal-periostal). Finalmente, el crecimiento sagital del cuerpo se lleva a cabo a través de la reabsorción del borde anterior de la rama, que proporciona espacio para la futura erupción de los molares.

- Crecimiento del proceso coronoides: éste crece y se remodela por aposición y reabsorción diferencial. Bajo la línea milohioidea, en su extremo inferior, ocurre aposición ósea en la cara interna y reabsorción en externa, lo que deriva en un incremento vertical de la coronoides con un desplazamiento curvado hacia arriba y afuera (Proffit, 2005).
- Crecimiento del proceso alveolar: El hueso alveolar crece estimulado por la presencia de los dientes, que actúan como matriz funcional de la unidad alveolar (Hutchinson et al., 2017). Normalmente existe aposición por lingual y reabsorción por vestibular, produciéndose un aumento de la dimensión vertical conjunta a la evolución de la dentición.

Finalmente, el funcionamiento y crecimiento de la lengua y los músculos periorales, y la expansión de las cavidades oral y faríngea, dan un estímulo para que el crecimiento mandibular logre su máximo potencial (Sperber et al., 2001).

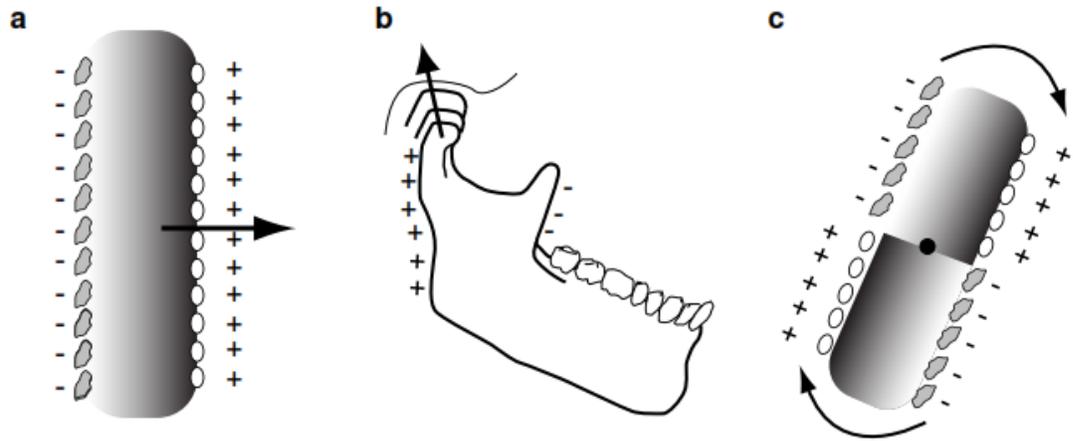


Figura 4. Fenómenos de remodelación ósea mandibular (extraído de Eyquem, 2018, modificado de Lieberman, 2011)

a) Deriva, b) Desplazamiento del proceso condilar y deriva en la rama, c) Rotación (combinación de deriva y desplazamiento, con aposición y reabsorción en sentidos opuestos)

2.3 Anatomía Mandibular

Desde una vista frontal, la mandíbula compone la estructura más inferior del viscerocráneo (Drake, 2010; Moore, 2007). Es un hueso impar, central -ubicado en la línea media facial-, y simétrico, que compone el tercio inferior del rostro y se conforma de tres partes principales: el cuerpo y las dos ramas mandibulares (Latarjet, 2004; Norton, 2012; Testut, 1964). El cuerpo mandibular, con forma de herradura, posee una cara exterior convexa y una cara interior cóncava, y se divide arbitrariamente en dos partes: la parte inferior se conoce como borde basilar o base de la mandíbula, y constituye el extremo libre hacia caudal. La porción superior, que constituye el límite del hueso hacia coronal, corresponde al proceso alveolar, y es la zona donde se produce la articulación con los dientes. El hueso que la compone se reabsorbe ante la pérdida dentaria. La cara exterior del cuerpo, en su porción más anterior, en la línea media y hacia la base, presenta una protuberancia denominada proceso mentoniano. En este mismo plano mediano se encuentra una sincondrosis que une ambos lados del cuerpo mandibular, y que en mandíbulas adultas se encuentra osificada y se denomina sínfisis mandibular. Hacia lateral del proceso mentoniano, a cada lado, se encuentran dos leves protuberancias denominadas tubérculos mentonianos, y lateral a ellos, a una altura media entre el borde superior del proceso alveolar y el borde inferior de la

base, se localiza el foramen mentoniano (Drake, 2010), que es el agujero en que termina el canal mentoniano que recorre el hueso en su interior.

Si se continúa el recorrido por la superficie externa del cuerpo, ya en su porción lateral, se encuentra la línea oblicua externa, una cresta que marca la inserción de los músculos depresor del labio inferior, depresor del ángulo oral y fascículos del platisma, y que se hace más amplia y evidente a medida que sube hacia posterior y superior, llegando hasta el borde anterior de la rama. En el punto más posterior, el cuerpo mandibular se une a las ramas de cada lado formando el ángulo mandibular, que une ambas partes, y que, al poseer orientaciones relativamente perpendiculares entre sus ejes mayores, conforman este hito anatómico.

En su cara interna, el cuerpo mandibular también presenta rasgos anatómicos fácilmente evidenciables: en la línea media se encuentran las espinas mentonianas, que pueden estar separadas, fusionadas, o en posición más superior o inferior. Estas espinas marcan el punto de inserción de los músculos geniioideos y genioglosos. Hacia posterior se eleva sobre la superficie la línea milohioidea, hito formado por la inserción del músculo milohioideo.

Las ramas mandibulares poseen una morfología cuadrangular y en ellas se distinguen las caras medial y lateral, y hacia superior se distinguen los procesos coronoides y condilares, entre los cuales se distingue la escotadura mandibular, que representa el límite superior de la rama en su porción media (Drake, 2010).

En la superficie interna de la rama se encuentra el foramen mandibular, que representa la abertura superior del canal mandibular por el cual discurre el nervio y los vasos alveolares inferiores. Inmediatamente anterosuperior al foramen mandibular se ubica la línula, una elevación triangular que sirve de inserción al ligamento esfenomandibular (Drake, 2010). Hacia anterior e inferior por esta misma superficie, se extiende hasta el cuerpo mandibular el surco milohioideo, una hendidura por la que discurre el nervio del músculo homónimo. Un último detalle anatómico relevante de la superficie interna de la rama, son las rugosidades para la inserción del músculo pterigoideo medial, que se localizan internamente en la zona cercana al ángulo mandibular.

Los procesos condilares se ubican en la zona más posterosuperior de la rama, sobre los cuellos condilares, en cuya superficie anterior se localiza la fosa pterigoidea, una depresión poco profunda en la zona de inserción del músculo

ptergoideo lateral. Los cóndilos se expanden medialmente, y articulan con el hueso temporal formando la articulación temporomandibular (Drake, 2010; Vogel et al., 2008).

Los procesos coronoides, por su parte, se elevan desde la unión de los bordes superior y anterior de la rama, y son procesos aplanados y levemente triangulares que sirven para la inserción de los músculos temporales.

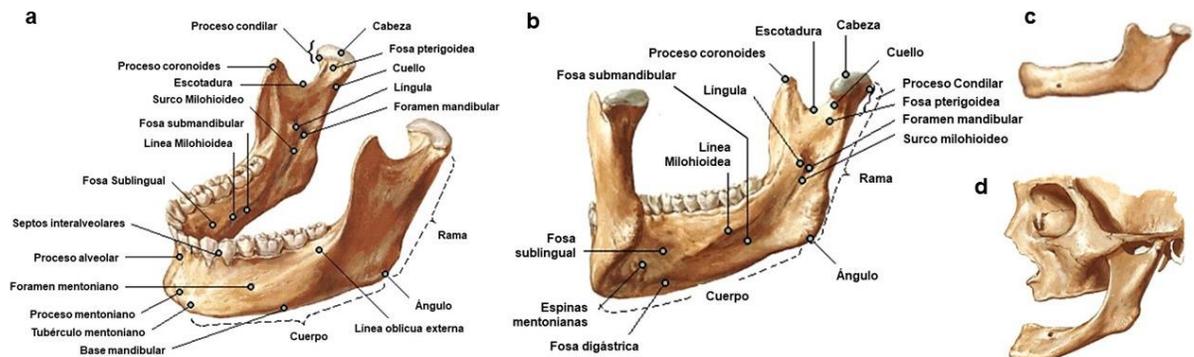


Figura 5. Anatomía mandibular (modificado de Netter, 1989).

- a) Vista anterolateral superior. b) Vista posteroinferior izquierda.
 c) Mandíbula de lactante. Se observa proceso alveolar poco desarrollado.
 d) Mandíbula de adulto mayor desdentado. Se observa reabsorción de proceso alveolar.

2.4 Masticación

A grandes rasgos, la masticación es un proceso fisiológico que se desarrolla en las primeras fases de la digestión, que tiene por objeto el procesamiento químico y sobre todo mecánico de los alimentos, que son triturados hasta formar un bolo alimenticio posible de ser deglutido. Son múltiples las estructuras del aparato estomatognático que permiten llevar a cabo la función fisiológica de la masticación. A continuación, se presentan algunos de los aspectos ligados a este proceso que tienen relevancia clave para los propósitos de este estudio.

2.4.1 Función Masticatoria y Movimiento Mandibular durante la masticación

¿Cómo se procesan mecánicamente los alimentos? Cuando se lleva a cabo la masticación de los alimentos y se ejercen cargas oclusales, fuerzas de reacción

sobre la articulación temporomandibular y fuerzas de tensión muscular sobre el hueso mandibular, éste se deforma imperceptiblemente (Lieberman, 2011; Van Eijden, 2000), como resultado de la suma de todas las microdeformaciones que se producen a nivel celular. El proceso de masticación es un proceso integrado y complejo en que hay actividad sensorial y motora, que permite en última instancia la formación del bolo alimenticio, tanto gracias a la actividad de los músculos de la masticación y a los movimientos rítmicos que éstos desenvuelven, como a los demás actores del sistema estomatognático que efectúan su rol (lengua, glándulas salivales, dientes etc.).

Generalmente los movimientos llevados a cabo por la musculatura siguen patrones establecidos controlados por el tronco cerebral (Farias-Gomes, 2010). Las fuerzas mencionadas en un principio producen distintos tipos de estrés (fuerza por unidad de área que experimenta una estructura cuando se le aplican cargas) (Lieberman, 2011; Van Eijden, 2000), que terminan en la deformación mandibular. Ellas cambian constantemente según su punto de aplicación, su magnitud y su dirección, y su recepción por parte de la mandíbula varía dependiendo de las propiedades materiales del tejido, de la naturaleza ósea y de su geometría y conformación espacial. A modo de ejemplo, durante el apriete dentario, la mandíbula es sometida a fuerzas de flexión en sentido sagital, resultante de los componentes de las fuerzas musculares, de las fuerzas de reacción en los procesos condilares y de las fuerzas oclusales, lo que en sentido frontal se traduce en una torsión, esto varía según el punto de aplicación de fuerza y el plano de referencia observado (Ugarte, 2017).

Los distintos tipos de deformación básicos que puede sufrir un cuerpo al ser sometido a cargas (Figura 6), son las siguientes:

- Compresión: se ejerce una fuerza con una dirección determinada, y el cuerpo disminuye su dimensión en esa misma dirección.
- Tensión: se ejerce una fuerza con una dirección determinada, y el cuerpo aumenta su dimensión en esa misma dirección.
- Corte o Cizallamiento: se ejerce una fuerza sobre una parte de la superficie del cuerpo, que sufre una deformación, mientras que la parte de la superficie donde no se ejerce la fuerza se mantiene en posición.

- Flexión: se ejercen fuerzas que generan tensión en un lado del cuerpo y compresión en otro, generando una deformación en una dirección perpendicular al eje mayor del cuerpo. Es un movimiento combinado.

- Torsión: se ejerce una fuerza en un extremo del cuerpo que genera torque (movimiento angular), provocando una rotación del cuerpo en torno a su eje mayor en un determinado sentido, mientras que en el extremo opuesto se produce una rotación en sentido contrario. Es un movimiento combinado.



Figura 6. Tipos de deformación básicas de un cuerpo (modificado de Lieberman, 2011).

Las flechas negras representan la fuerza que se ejerce sobre el cuerpo, y las flechas blancas representan la deformación que éste sufre

a) Compresión, b) Tensión, c) Cizalla, d) Flexión, e) Torsión.

Cuando los tipos de deformación básicos que puede sufrir un cuerpo se extrapolan a movimientos reales que suceden a nivel mandibular ante las cargas masticatorias, se describen tres posibilidades de deformación que en su conjunto dan cabida a la distorsión global de la mandíbula, que siempre se ven condicionadas por el escenario de carga (oclusión uni/bilateral, simétrica o asimétrica, etc.).

- Flexión sagital (Figura 7): el cuerpo mandibular rota o se desplaza hacia la fosa mandibular. Se produce una flexión sagital a causa del componente vertical de la fuerza muscular, de la fuerza de reacción a nivel de los cóndilos y de la fuerza en el punto de mordida. La magnitud de la flexión depende del punto de aplicación de la fuerza y del tamaño del brazo de palanca que se produzca, y su localización depende del punto de mordida (Morales, 2018). Las relaciones esqueléticas anteroposteriores alteradas definen cambios en los brazos de palanca, como en el caso de las relaciones clase II y III de Angle, en que la relación del primer molar superior con el inferior, es más distal o mesial de lo que

se considera perfectamente armónico (Quirós-Álvarez, 2010). Esto tiene un efecto sobre el estrés que se genera en el hueso.

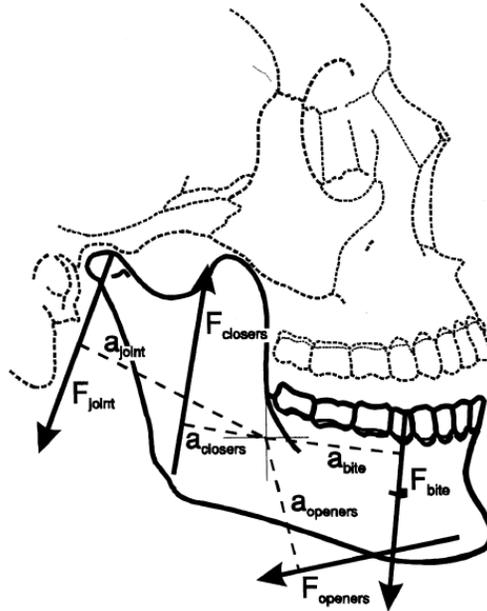


Figura 7. Fuerzas que generan flexión sagital (extraído de Koolstra, 2002).

Vista sagital de las fuerzas actuantes y las palancas generadas.

+: centro de gravedad, $F_{closers}$: resultante de fuerzas del movimiento de cierre, $F_{openers}$: resultante de fuerzas del movimiento de apertura, F_{joint} : fuerza de la articulación, F_{bite} : fuerza de la masticación, a : brazo de momentum de las distintas fuerzas.

- Flexión transversal (Figura 8): se genera por efecto del componente lateral de la fuerza del masetero y del temporal en los lados de trabajo y de balance, y por el componente lateral de la fuerza oclusal. Ocurre tardíamente hacia el final de la masticación, por acción de la actividad de la porción profunda del masetero de lado de balance. Su magnitud aumenta desde posterior hacia anterior, alcanzando su peak a nivel de la sínfisis. Finalmente produce compresión en la cortical vestibular y tensión en la cortical o superficie lingual (Morales, 2018).

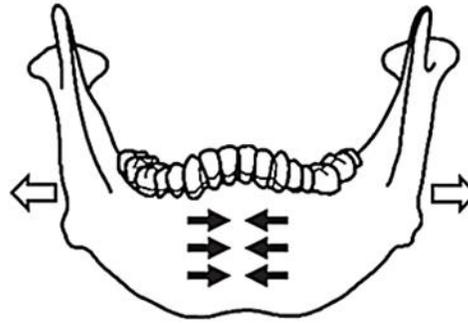


Figura 8. Flexión Transversal de la Mandíbula (extraído de Fukase, 2007).

Se muestra la deformación lateral en un plano transversa. Las flechas blancas muestran el efecto de las fuerzas masticatorias. Las flechas negras representan el estrés en la superficie vestibular del hueso, en la zona de la sínfisis.

La explicación de los fenómenos que se producen en lado de trabajo (lado donde se interpone el alimento entre los dientes), y el lado de balance (lado opuesto al que lleva a cabo la masticación), fueron explicados por Cristina Morales (Morales, 2018), describiendo que en el lado de trabajo la fuerza de reacción de la ATM y la fuerza en el punto de mordida tienen un componente inferior, mientras que la fuerza muscular, un componente superior. Así es como se genera compresión en el borde inferior y tensión en el lado oclusal del cuerpo y la rama. A su vez, en el lado de balance se genera esta misma flexión, pero en menor medida, puesto que no existe punto de mordida. Entre la sínfisis y el punto de mordida, sin embargo, se produce la flexión en el sentido inverso, con tensión en el borde inferior del cuerpo y compresión en el borde superior (Figura 8).

En un escenario de incisión, por otra parte, donde la carga se ejerce de manera simétrica, se producirían fuerzas similares a ambos lados de la mandíbula.

- Torsión mandibular: simultaneo a la flexión sagital y transversal ya descritas, se ocasiona una rotación del cuerpo mandibular en torno a su eje mayor. Lo anterior se traduce en un movimiento de eversión del borde inferior del cuerpo, y una inversión del extremo superior, en la zona del reborde alveolar (Morales, 2018). Es la resultante del torque que se produce por la fuerza del masetero y del temporal lateralmente al eje de mordida (eje neutral), y la fuerza oclusal que actúa medialmente al él.

En un escenario de incisión se produce torsión bilateral del cuerpo mandibular, lo que determina que se genere compresión en la zona superior de la sínfisis y tensión en la porción más inferior (Figura 9).

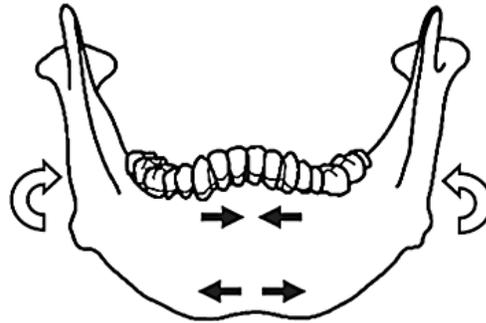


Figura 9. Torsión mandibular en incisión (extraído de Fukase, 2007).
Las flechas blancas muestran el efecto de las fuerzas masticatorias. Las flechas negras representan es estrés en la superficie vestibular del hueso, en la zona de la sínfisis.

2.4.2 Músculos de la Masticación

A modo de resumen, sabemos que la musculatura estriada de la cara se forma a partir de tejido mesenquimático de origen mesodérmico (Morales, 2018). Este tejido migra tempranamente desde el primer arco faríngeo, en el caso de los músculos masticadores (inervados por el nervio mandibular); y desde el segundo arco en el caso de los músculos del sistema músculo-aponeurótico superficial (inervados por el nervio facial) (Figura 10) (Meruane et al., 2012).

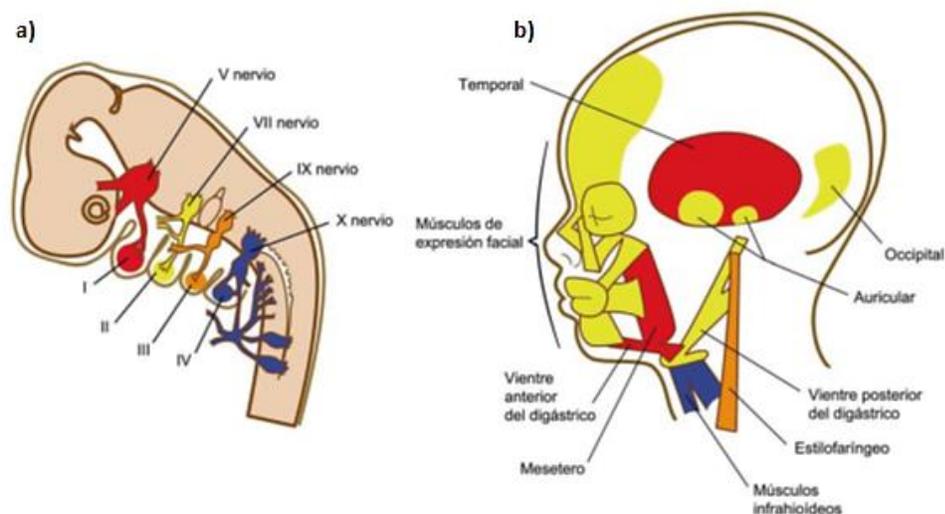


Figura 10. Origen de los músculos de la cara y su respectiva innervación dependiente del arco faríngeo de origen (modificado de Meruane et al., 2012).
a) En rojo se observa el primer arco faríngeo y nervio trigémino
b) En rojo se muestran los músculos de la masticación: temporal, masetero y vientre anterior del digástrico.

Los músculos de la masticación tienen su origen en el cráneo y en el hueso hioides (parte fija), y sus inserciones se encuentran en la mandíbula (parte móvil). Éstos facultan la realización de movimientos de elevación, descenso, protrusión, retrusión y lateralidad de la mandíbula. Sus características más importantes se describen en la Tabla 1 (Morales, 2018).

Tabla 1. Descripción general de los músculos de la masticación (modificado de Morales, 2018).

Músculo	Origen	Inserción	Inervación	Función Principal
Masetero, porción superficial	Borde inferior de los 2/3 anteriores del arco cigomático	Ángulo mandibular, parte inferior y lateral de la rama mandibular	Ramo masetérico del nervio mandibular (ramo del nervio trigémino)	Eleva la mandíbula Facilita la protrusión
Masetero, porción profunda	Borde medial del arco cigomático; borde inferior del 1/3 posterior del arco cigomático	Parte súperolateral de la rama mandibular hasta el proceso coronoides	Ramo masetérico del nervio mandibular (ramo del nervio trigémino)	Eleva la mandíbula
Temporal	Fosa temporal hasta la línea temporal inferior Cresta infratemporal	Proceso coronoides y la cresta temporal	Ramos temporales profundos anterior y posterior del nervio mandibular	Elevador mandibular Retrae la mandíbula (fibras posteriores)
Pterigoideo medial, porción superficial	Tuberosidad del maxilar; proceso piramidal del hueso palatino	Cara medial de la rama y ángulo mandibular	Ramo pterigoideo medial del nervio mandibular	Eleva, protruye y permite movimiento de lateralidad
Pterigoideo medial, porción profunda	Fosa pterigoidea (lámina lateral)	Cara medial de la rama y ángulo mandibular	Ramo pterigoideo medial del nervio mandibular	Eleva, protruye y permite movimiento de lateralidad
Pterigoideo lateral, porción superior	Ala mayor del esfenoides Cresta infratemporal	Disco y cápsula de la ATM	Ramos pterigoideos laterales del nervio mandibular	Desciende, protruye y permite movimiento de lateralidad
Pterigoideo lateral, porción inferior	Cara lateral de la lámina lateral del proceso pterigoides	Fosita pterigoidea en el cuello mandibular	Ramos pterigoideos laterales del nervio mandibular	Desciende, protruye y permite movimiento de lateralidad a la mandíbula
Milohioideo	Línea milohioidea de la mandíbula	Rafe mediano milohioideo y hueso hioides	Nervio milohioideo (del nervio alveolar inferior, del nervio mandibular)	Desciende la mandíbula. Eleva hioides y piso de la cavidad oral
Digástrico, vientre anterior	Tendón intermedio del músculo digástrico	Cara inferior del tubérculo mentoniano Fosa digástrica	Nervio milohioideo.	Desciende la mandíbula

2.4.3 *Morfología Funcional Mandibular: relación de la dieta con la anatomía ósea mandibular*

En un recorrido a través de la evolución humana, se observan hitos importantes que marcaron grandes cambios biofisiológicos en los organismos. Uno de ellos fue la transición de una economía de subsistencia basada en la caza y recolección a la producción agrícola de alimentos, ocurrida durante el Holoceno. El paso al consumo de productos altos en azúcares y bajos en proteínas, más blandos, determinó una disminución en la demanda mecánica masticatoria de los agro-alfareros con respecto a los cazadores-recolectores (Von Cramon-Taubadel, 2017), cuya dieta consiste en alimentos más duros y tenaces, que producen una mayor actividad y fuerza muscular y masticatoria (Agrawal et al., 1998). Además, ha sido propuesto que los cambios de las propiedades materiales de la dieta se deben no sólo a los alimentos sino también el tipo de procesamiento que reciben antes de ser consumidos (Daegling et al., 1991), lo cual cambió significativamente con la transición en la estrategia de subsistencia. Si en el primer contexto los alimentos solían consumirse crudos, con un insignificante o nulo procesamiento, en el segundo escenario comenzaron a recibir tratamiento químico y mecánico previo a su ingesta (cocción y molienda, respectivamente).

En la mandíbula, el tipo de alimentación tendría una relación directa con la plasticidad ósea: las poblaciones que históricamente han tenido dietas basadas en la ingesta de alimentos de consistencia dura y resistente (poblaciones de cazadores-recolectores), tienen cráneos más grandes y robustos que aquellos de quienes tienen una dieta basada en el consumo de alimentos de consistencia comparativamente blanda (poblaciones de agricultores), que presentan cráneos de menor tamaño y más gráciles (Carlson et al., 1977; Paschetta et al., 2010; Perez et al., 2009; Stynder et al., 2007). Asimismo, Von Cramon Taubadel (Von Cramon-Taubadel, 2011), plantea que la mandíbula, en contraste con el cráneo, refleja de manera significativa la economía de subsistencia, y no respondería a un patrón de evolución neutral. Como ya sabemos que existen zonas de mayor exigencia mecánica (particularmente áreas en tensión y/o cizallamiento) que por lo tanto deben aumentar su tamaño, y zonas en que la exigencia es menor o bien zonas

en compresión en las que aumenta la reabsorción ósea (Ruff et al., 2006), se debería generar un equilibrio que es el que contribuye finalmente las diferencia en forma y tamaño mandibular entre individuos y, sobre todo, entre poblaciones. Un ejemplo de cómo la función masticatoria es capaz de modificar la forma mandibular en grupos humanos se puede apreciar en el trabajo de Galland et al (Carlson et al., 1977; Galland et al., 2016), quienes analizaron una población de Baja Nubia en África que cambió su estrategia de subsistencia pasando de ser cazadores-recolectores a transformarse en agricultores en un rango de casi 12 mil años, describiendo que la reducción de las demandas funcionales masticatorias deriva en cambios en la morfología facial, disminución del tamaño de los dientes y de la mandíbula. Un aspecto que vale considerar es que, si bien en comparación a sus predecesores evolutivos el cráneo de *Homo sapiens* se ha vuelto más grácil, su anatomía craneal es bastante eficiente en términos de fuerza oclusal y capacidad de sobrellevar grandes cargas masticatorias (O'Connor et al., 2005; Wroe et al., 2010). Por otro lado, se describe también una prevalencia mayor de maloclusiones en poblaciones actuales -caracterizadas por poseer una alimentación fundamentalmente blanda-, sobre todo urbanas, que en aquellas arqueológicas, llegando a considerarse una de las enfermedades de la civilización (Corruccini, 1984). Los cambios en la dieta, si bien han permitido la adaptación de la especie a su entorno, también pueden haber traído consigo aspectos negativos: la reducción de las fuerzas masticatorias actuarían especialmente durante el crecimiento mandibular y craneofacial, resultando en una incongruencia entre el tamaño del arco dentoalveolar, que no responde de manera plástica a las fuerzas masticatorias, y la mandíbula, lo cual constituiría una causa relevante para la existencia de anomalías dentomaxilares (Corruccini et al., 1981). Sumado a lo anterior, se ha visto que la actividad masticatoria podría jugar un rol importante en el desarrollo craneal, y que podría estar relacionada con el tipo de alimentos ingeridos, y que dicha actividad se vería afectada también por la relación máxilomandibular (Lieberman et al., 2004). Se ha observado, por ejemplo, que individuos modernos que tienen cargas masticatorias alteradas porque poseen relaciones máxilomandibulares de prognatismo o retrognasia (que

corresponderían a clases II y III esqueléticas), presentan una cara larga pero estrecha, cigomáticos deprimidos, órbitas romboideas, apertura nasal larga y un paladar anteroposteriormente más alargado (Eyquem, 2018), lo que podría afectar la resistencia y la distribución de cargas que estos huesos ejercen ante las fuerzas fisiológicas que se ejercen durante la masticación.

En conocimiento de estos antecedentes, parte de la muestra de esta investigación resulta un foco de estudio interesante desde este punto de vista, puesto que se contextualiza dentro un marco histórico-geográfico particular: los individuos arqueológicos analizados pertenecen a poblaciones sudamericanas, que en su generalidad se caracterizan por tener una variada ecología (Ugarte, 2017), y por ser una de las últimas regiones en el mundo colonizadas por el humano moderno alrededor de 12.500-13.000 AP (Borrero, 1999; Lanata et al., 2008); de hecho, se describe que las poblaciones localizadas en el extremo sur del continente mantuvieron su cultura cazadora-recolectora más allá del promedio de las civilizaciones, conservándola incluso mientras simultáneamente poblaciones ubicadas más al norte ya tenían un estilo de vida agro-alfarero. En adición, la población nativa de América del Sur presenta una alta variabilidad en sus rasgos craneofaciales, y se ha sugerido que esta variabilidad tiene relación con las economías de subsistencia de las distintas poblaciones (Perez et al., 2007; Pucciarelli et al., 2006; Sardi et al., 2005; 2006).

2.5 Mecanotransducción

¿Cómo los estímulos mecánicos generan cambios bioquímicos, que luego se traducen en modificaciones físicas? Estamos en antecedentes de que cuando se desarrolla el proceso de masticación o mientras existe un fenómeno de oclusión, el hueso mandibular recibe las cargas oclusales que se transmiten a él a través de los dientes, además de recibir tensiones en su superficie dadas por la contracción de los músculos de la masticación que se insertan en él. La fuerza que ejercen estos músculos, tanto en magnitud como en dirección, determina la generación de tensiones y brazos de palanca que permiten la disipación de las

cargas. Esta disipación se produce gracias a las microdeformaciones que se dan a nivel microscópico en el tejido óseo, que constituyen señales de estrés mecánico que generan movimiento en las diversas estructuras celulares del tejido, que de esa manera se traducen en señales bioquímicas de aposición, reabsorción o mantención de la masa ósea. El tejido óseo es un tejido metabólicamente activo que requiere de mucha energía para ser mantenido, por lo que, si existe masa ósea innecesaria, es decir, que en un determinado hueso haya espesor óseo que no se necesite puesto que no existen fuerzas físicas que requieran de su presencia para ser soportadas-, se reabsorbe ese tejido sobrante como un mecanismo de economía energética para el organismo. Por otra parte, cuando sobre un hueso se ejercen cargas muy altas que sobrepasan su equilibrio de mantención, generando señales que indican que es necesario el incremento de masa ósea y una nueva morfología en esa zona para elevar la resistencia mecánica, se producen fenómenos de aposición. Esto se conoce como rango de mantención de la masa ósea de Frost (Frost, 1987), y delimita el umbral que se debe sobrepasar para que existan fenómenos de aposición y reabsorción en un determinado hueso. Visto que este proceso se da con relación al estímulo mecánico local producido por las cargas, los fenómenos de remodelación son heterogéneos, selectivos, y se ocasionan localmente y con intensidad variable dependiendo de su requerimiento, con el propósito de modificar la forma para alcanzar un estado en el que no se sobre exija el metabolismo (Ruff et al., 2006).

El mecanismo fisiológico que explica el proceso mediante el cual las cargas mecánicas modifican la morfología ósea, se denomina mecanotransducción. A grandes rasgos, este mecanismo permite que los estímulos mecánicos que sobrepasan el umbral de mantención de Frost produzcan una respuesta bioquímica que genera un cambio en la transducción del ADN (Ingber, 2006), generándose señales de activación de los osteocitos, que a su vez coordinan la actividad de osteoblastos y osteoclastos, principales responsables directos de la remodelación. En el proceso participan múltiples moléculas y estructuras involucradas en el traspaso de señales; todo se inicia cuando las cargas y

tensiones actuantes, generan deformaciones en la membrana, citoesqueleto y proteínas de la matriz extracelular de las células receptoras en el tejido óseo. Estas deformaciones tienen efecto sobre organelos intracelulares y moléculas presentes en el medio, y también sobre proteínas reguladoras presentes en ella (Toro-Ibacache, 2013). Finalmente, estos procesos producen alteraciones estructurales que afectan la estructura y el comportamiento electrobioquímico. Las vías celulares y bioquímicas de la señalización han sido ampliamente estudiadas, y las estructuras y moléculas vinculadas a los procesos de mecanotransducción son numerosos (Felsenthal et al., 2017). Un ejemplo de estos mecanismos descrito por Ingber (Ingber, 2006), explica la inducción del remodelamiento por los cambios de potencial electroquímicos que se producen en las membranas celulares, que afectan la transducción de señal desde el exterior al interior de los osteoblastos, causadas por el estrés de cizalla que se provoca en la superficie celular cuando se movilizan fluidos en la matriz debido a microdeformaciones causadas por contracciones musculares cíclicas. La mayor parte de las vías descritas tiene relación con los cambios conformacionales que se producen en las membranas, producto del movimiento del espacio intersticial y desplazamiento de fluidos, afectando así la tasa de apertura y cierre de los canales y provocando alteraciones en la actividad metabólica celular.

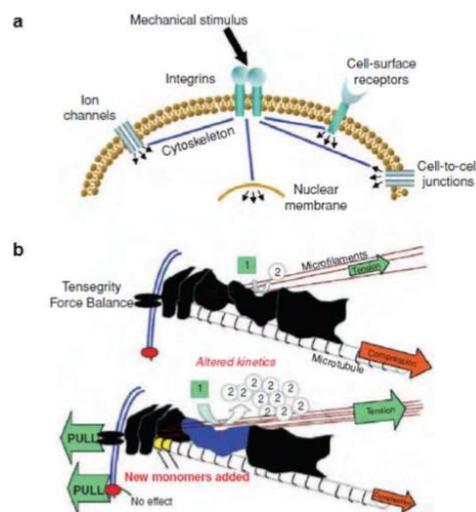


Figura 11. Procesos involucrados en la mecanotransducción (modificado de Ethier et al., 2007).

- a) mecanoreceptores y vías de señalización intracelular.
 b) el citoesqueleto como transductor: deformación y activación de las proteínas cinéticas bajo carga.

2.6 Análisis de elementos finitos (AEF)

El análisis de elemento finito (AEF) es una técnica de ingeniería desarrollada durante la primera mitad del siglo veinte, que permite simular y predecir la respuesta mecánica de una estructura que se somete a cargas, en términos de microdeformación y estrés (Toro-Ibacache, 2013). Si bien sus primeras aplicaciones se dieron en el área de la ingeniería y la medicina ortopédica, en sus orígenes se mantuvo mayormente vinculada a campos de estudio relativos a la mecánica de tejidos blandos, dinámica de fluidos y sistema músculo esquelético. Su aplicación en estudios biomecánicos que tuviesen el propósito de analizar cambios evolutivos o de adaptación entre cuerpos semejantes sometidos a condiciones distintas, es posterior (Toro-Ibacache, 2013). El uso de estas metodologías ha ampliado su alcance y proyección, siendo utilizada ahora en el campo de la cirugía, la ortodoncia, la rehabilitación y la implantología, entre otros, gracias a las tecnologías computacionales desarrolladas durante las últimas décadas. Es por esto que en tiempos más recientes, el AEF ha emergido como una técnica de modelamiento útil en el estudio de sistemas biológicos en los que acercamientos experimentales directos no son plausibles (Kupczik, 2008), utilizándose, por ejemplo, en investigaciones sobre efectos de cargas masticatorias en mandíbulas de primates adultos (Kupczik et al., 2007; Ross et al., 2005; Strait et al., 2005; 2007), en sistemas vivos, y en otras relacionadas con la aplicación de fuerzas en dientes, con implicancias en la interpretación de adaptaciones de dieta con fósiles humanos (Macho et al., 2005; Shimizu et al., 2007). En el campo de la antropología física resulta una técnica que ofrece la ventaja técnica de no intervenir las muestras en estudio, puesto que éstas suelen ser muestras arqueológicas que constituyen patrimonio cultural que, si bien representa un valor científico para efectos del investigador, también poseen un alto valor patrimonial, cultural y humano, que debe ser protegido, como es el caso de dos de las muestras óseas utilizadas en el presente trabajo. Continuando con las aplicaciones del AEF, en estudios relativos al área médica que indagan sobre comportamiento de tejido óseo ante cargas, también se ha utilizado esta técnica

para caracterizar el proceso de mecanorrecepción y mecanotransducción a nivel de hueso trabecular (Huiskes et al., 2000; Mullender et al., 1994), y de huesos completos (Beaupré et al., 1990a, 1990b), lo que ha elevado significativamente nuestro entendimiento sobre los factores principales que controlan la morfología ósea (Richmond et al., 2005).

Para poder someter un cuerpo a análisis de elementos finitos, el punto de partida es una estructura 3D creada a partir de la segmentación de una tomografía computarizada (TC), valiéndose del uso de software computacionales. La metodología aplicada al AEF se centra en la representación de una estructura bajo la forma de una malla conformada por un número discreto de estructuras - elementos finitos-, unidos entre sí por nodos, con lo cual se genera una estructura bi o tridimensional (Kupczik, 2008; Toro-Ibacache, 2013), cuya respuesta ante la carga se puede predecir como una serie de problemas discretos que pueden resolverse mediante análisis matemático (Rayfield, 2007). En otras palabras, el cuerpo en estudio, una vez transformado a malla de elementos finitos, puede ser intervenido aplicando sobre él distintas fuerzas y restricciones cinemáticas -cuyas propiedades son definidas por el investigador-, que determinan limitaciones para el movimiento del cuerpo al momento de efectuársele las cargas. El resultado son microdeformaciones (*microstrains*), o desplazamientos nodales cuantificables, lo que faculta la medición y objetivación de los efectos que producen las fuerzas sobre el determinado cuerpo. Tanto la geometría y cantidad de los elementos, como la ubicación de los nodos, afecta el procesamiento de los datos, y se escogen en función de las necesidades del estudio. La Figura 12 muestra ejemplos de configuraciones posibles para los elementos finitos.

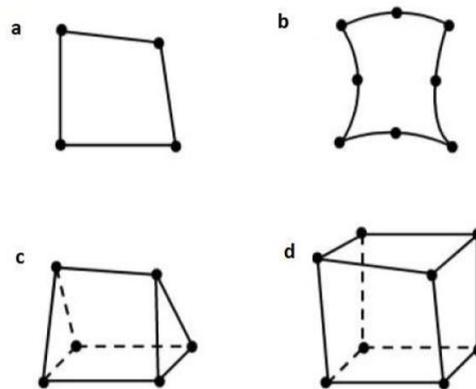


Figura 12. Ejemplos de tipos de elementos (modificado de Richmond et al., 2005).

Dependiendo de su espacialidad, los elementos pueden ser de una, dos o tres dimensiones, pudiendo ser lineales (a, c, d), o cuadráticos (b). Dependiendo de la ubicación de los nodos, su comportamiento bajo carga puede ser descrito mediante funciones lineales o polinomiales.

El método de desarrollo del AEF consta de tres grandes etapas: el preprocesamiento, la solución y el postprocesamiento, al final de las cuales se obtienen resultados numéricos que pueden graficarse en diagramas de contorno de colores: en este caso, figuras tridimensionales que presentan los cuerpos óseos deformados tras la aplicación de las cargas, con superficies coloreadas de rojo que marcan los territorios donde hubo mayor desplazamiento nodal, superficies verdes en las zonas intermedias, y azules donde el desplazamiento fue bajo o nulo.

La metodología puede aplicarse en la comparación del comportamiento biomecánico de formas esqueléticas que varían entre sí, ayudando a dilucidar los procesos subyacentes a la adaptación funcional y la morfogénesis de tejidos biológicos, y potencialmente a entender los cambios estructurales de la morfología en respuesta a cambios del estilo de vida (Richmond et al., 2005), como es la intención de este estudio.

En definitiva, para tener una perspectiva panorámica de la relevancia que adquiere el AEF como herramienta de estudio, se debe considerar que el reconocimiento de la mecánica y la mecanotransducción celular en el desarrollo de los tejidos, también puede ayudar a explicar su relación con enfermedades (Ingber, 2003). Entender la relación entre estructura y función en tejidos vivos, así como los mecanismos fundamentales de mecanotransducción, puede guiar la ruta hacia

formas de intervención terapéuticas completamente nuevas (Ingber, 2003). En las ciencias odontológicas, y en el dominio particular de la cirugía, la ortodoncia y la ortopedia, el desentrañamiento de estos conceptos permitiría la elaboración fundamentada en la evidencia de enfoques de tratamiento interceptivos como solución para diversas anomalías dentomaxilares, altamente prevalentes en poblaciones actuales, que requieren una comprensión mayor de la morfología funcional de los tejidos craneofaciales. A medida que la ortodoncia y la ortopedia dentofacial se sumergen en la era 3D, el análisis de elementos finitos puede ser usado para diseñar mecánicas eficientes, con bajo riesgo de reabsorción radicular, para alcanzar un manejo conservador de las maloclusiones (Roberts et al., 2015).

3. HIPÓTESIS

Las poblaciones con distinta intensidad de carga masticatoria y relación máxilomandibular presentan diferencias en la respuesta mecánica mandibular frente a las fuerzas musculares, oclusales y articulares generadas durante la oclusión.

Expectativa: individuos con dietas que exigen cargas masticatorias intensas, presentan una morfología ósea mandibular más robusta, que les permite sufrir menor deformación frente al estrés mecánico que aquellas con dietas más blandas. Además, los individuos con relación máxilomandibular alterada presentan patrones alterados de microdeformación, donde la ubicación relativa de valores altos y bajos de microdeformación es distinta.

4. OBJETIVO GENERAL

Estudiar, mediante análisis de elemento finito, las diferencias en magnitud y ubicación de la microdeformación ósea que sufren mandíbulas de poblaciones con distinta intensidad de carga masticatoria y tipo de relación máxilomandibular.

5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la reconstrucción virtual tridimensional de la mandíbula de un individuo representativo de cada población antropológica estudiada a partir de su TC.
- Construir y resolver un modelo de elementos finitos de cada individuo.
- Describir y comparar las diferencias en magnitud y distribución de microdeformaciones predichas por cada modelo.
- Registrar las diferencias observadas entre las muestras de las diferentes poblaciones en relación con las características morfológicas de cada individuo y el grupo al que representa; discutir las implicancias clínicas de esta relación.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño del estudio corresponde a un estudio transversal experimental, con evaluación cualitativa y cuantitativa de los resultados, sin aplicación de test estadísticos. Se prescindirá de estos últimos debido a que la muestra es reducida, a causa de la complejidad en la construcción de modelos para AEF.

Este estudio se enmarca dentro del proyecto FONDECYT 11150175, y fue autorizado por el Comité de Ética de Investigación en Seres Humanos (CEISH), de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile, con código N° 203-2015 (Anexo n°1).

6.1 Muestra



Figura 13. Mapa del origen geográfico de las muestras (extraído de Eyquem, 2018).
In: individuos de carga intensa.
Mo: individuos de carga moderada.
Le: individuos de carga leve.
Al: individuos de carga alterada.

En esta investigación se utilizarán las TCs de cinco individuos representativos de poblaciones que difieren en cuanto a su estrategia de supervivencia -por tanto en la consistencia de sus dietas-, y en su relación máxilomandibular. Dos de los cinco individuos representan y pertenecen a poblaciones arqueológicas, y los tres restantes son de poblaciones actuales. Estos individuos fueron seleccionados en una etapa previa a esta tesis por presentar una forma craneal y mandibular “promedio” (y así, representativa) de los individuos de su grupo, de acuerdo a análisis realizados mediante morfometría geométrica (Eyquem, 2018; Ugarte, 2017), de la que se eligieron los más representativos de cada grupo. El origen geográfico de las poblaciones que componen la muestra mayor se muestra en la Figura 13, y la descripción de la muestra de los cinco individuos de la presente investigación, así como la caracterización de la muestra mayor de la que fueron obtenidos, se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de la muestra.

	Grupo	Sexo	Colección	Descripción	Origen específico	Origen del grupo representado	Referencias
Individuo 1	Carga Intensa	M	Chubut (Cu)	Pertenece a una población arqueológica de cazadores-recolectores, individuos nómades que basaban su subsistencia en la caza de animales y recolección de frutos, semillas y/o mariscos	Noroeste Patagonia Argentina, facilitada por el MLP	Muestras de Chonos chilenos obtenidas del HCUCH, y argentinos de Tierra del Fuego y la Patagonia, que fueron facilitadas por el MPI-EVA, el MLP y el MNHF	(Bernal et al., 2006; Kelly, 1983).
Individuo 2	Carga Intermedia	M	Pica 8 (P8)	Pertenece a una población arqueológica de agricultores, con una dieta más procesada que la primera dada por el cultivo, el mayor procesamiento químico y mecánico de los alimentos y un mayor consumo de hidratos de carbono, legumbres, vegetales.	Complejo Pica-Tarapacá, Zona Norte de Chile, facilitada por FACSO	Muestras de habitantes de la Pampa Grande (NOA), y del complejo Pica-Tarapacá, y a Mapuches de la Pampa Argentina, cuyas muestras fueron facilitadas por FACSO, el MNHF y el MPI-EVA.	(González-José et al., 2005; Planella et al., 2014).
Individuo 3	Carga Leve	F	Población actual urbana (Mo)	Individuo moderno, urbano y contemporáneo, con una alimentación basada en productos industriales altamente procesados, de consistencia blanda	Zona Centro de Chile, facilitada por HCUCH	Muestras facilitadas por el HCUCH (obtenidas para fines ajenos a éste), y al CCG de FACSO.	(Monteiro et al., 2010; Smith, 1984).
Individuo 4	Carga Alterada Clase II	F	Población actual urbana (A2)	Individuo urbano contemporáneo, que presenta alteraciones severas en las relaciones anteroposteriores máxilomandibulares y oclusales, de retrognasia (correspondiente a clase II esquelética).	Zona Centro de Chile, facilitada por ICOR	Muestras obtenidas del ICOR	
Individuo 5	Carga Alterada Clase III	M	Población actual urbana (A3)	Individuo urbano contemporáneo, que presenta alteraciones severas en las relaciones anteroposteriores máxilomandibulares y oclusales, de prognatismo (correspondiente a clase III esquelética).	Zona Centro de Chile, facilitada por ICOR	Muestras obtenidas del ICOR	

HCUCH: Hospital Clínico Universidad de Chile (Santiago, Chile).

MPI-EVA: Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva (Leipzig, Alemania).

MLP: Museo de La Plata (La Plata, Argentina).

MNHF: Museo de Historia Natural de Florencia (Florencia, Italia).

FACSO: Facultad de Ciencias Sociales de la Universidad de Chile (Santiago, Chile).

CCG: Colección Osteológica Subactual de Santiago del Cementerio General.

ICOR: Instituto De Cirugía - Ortodoncia, Rehabilitación Oral Y Maxilofacial.

Los individuos satisfacen los siguientes criterios de inclusión:

- Edad adulta (determinada por el cierre apical del tercer molar y/o el cierre de la sincondrosis esfeno-occipital del cráneo del individuo).
- Presentar tejido óseo en buen estado, sin malformaciones, trauma masivo cráneo facial ni cirugías ortognáticas.
- Presencia de al menos un molar inferior e incisivos centrales y laterales inferiores en oclusión, o en su defecto, proceso alveolar intacto tras pérdida peri o post-mortem.

6.2 Reconstrucción tridimensional

La reconstrucción tridimensional (3D) de la morfología mandibular se hizo valiéndose del uso del programa de visualización y análisis virtual tridimensional, Avizo v.9.1. (FEI, Hillsboro, OR, USA). Se realizó una segmentación semi automática de las TCs basada en umbrales de la escala de grises en las imágenes para separar el hueso del aire y los tejidos circundantes. Adicionalmente se efectuó una segmentación manual para aislar la mandíbula del resto del cráneo, y a su vez, para separar la mandíbula de los dientes. Para los fines de esta investigación no fue necesario separar el tejido óseo cortical del tejido óseo trabecular, puesto que la diferencia que se generaría en los resultados en términos de distribución de microdeformaciones no sería significativa según el resultado de análisis anteriores de validación y sensibilidad (Godinho, 2016). Debido a esto el hueso esponjoso fue considerado cortical. Además, la resolución con la que se cuenta no habría permitido la distinción de las trabéculas, y la mandíbula fue considerada una estructura sólida.

Las muestras de los individuos arqueológicos estudiadas se encontraban en buen estado de conservación y no presentaban ausencia de dientes clave para la investigación, por lo que no fue necesaria la reconstrucción de las estructuras. En el caso de los individuos de carga intensa e intermedia, los dientes presentaban un alto grado de atrición y/o leves fracturas coronarias, pero se conservaba la integridad estructural suficiente para cumplir su rol en la masticación sin requerir reconstrucción artificial.

6.3 Análisis de Elementos Finitos

Luego de la segmentación, los datos volumétricos generados fueron remuestreados para generar voxels isométricos. Los volúmenes 3D fueron exportados como set de imágenes en formato .bmp y transformados a mallas de elementos cúbicos con ocho nodos, a través de conversión directa mediante el software VOX-FE (Fagan et al., 2007; Liu et al., 2012). En base a valores obtenidos de la literatura y a previos estudios de validación, se asignó un módulo de elasticidad (módulo de Young) de 17 GPa al hueso y de 50 GPa a los dientes (Fitton et al., 2012; Gröning et al., 2011; Kupczik et al., 2009), que fue modelado homogéneamente como un material elástico lineal e isotrópico, dado que se ha demostrado que un modelo generado con estas propiedades es capaz de predecir microdeformación de forma suficientemente precisa si los modelos cuentan con la resolución suficiente (Fitton et al., 2015; Gröning et al., 2011), como era el caso de las TC utilizadas. También se asignó un coeficiente de Poisson de 0,3 tanto para hueso como para diente (Kupczik et al., 2007; Szwedowski et al., 2011; Toro-Ibacache et al., 2016).

A los modelos que se generaron les fueron aplicadas restricciones cinemáticas en las superficies articulares de las cabezas mandibulares en los ejes espaciales x, y, z, para simular escenarios de masticación (Toro-Ibacache et al., 2016). En el eje vertical se fijaron las restricciones en el borde incisal de ambos incisivos centrales inferiores (I1), y en la punta de las cuatro cúspides de los primeros molares inferiores (M1), para simular puntos de contacto comunes en la masticación (Toro-Ibacache et al., 2016). Las zonas de inserción muscular de los músculos masticatorios participantes en los movimientos de elevación mandibular considerados para esta investigación -es decir, músculos temporales, maseteros, y pterigoideos mediales-, fueron definidas manualmente sobre las superficies óseas y delimitadas según su posición anatómica natural. Para ello se marcaron hitos sobre la superficie mandibular, que posteriormente delimitaron territorios de inserción. Adicionalmente, se marcaron hitos en el centro de masa de los orígenes craneales de los mismos músculos, sobre los cráneos temporalmente posicionados en su localización anatómica normal con respecto a la mandíbula,

dispuestos allí para este fin. Una vez que se tuvieron todos los hitos dispuestos, con las zonas musculares donde se generarían las fuerzas ya localizadas, y los vectores que indicarían su dirección ya generados, se prescindió de las estructuras craneales nuevamente, para obtener finalmente los modelos convertidos a mallas de elementos finitos, con sus zonas de inserción muscular determinadas y sus restricciones cinemáticas fijadas, prontos para ser resueltos, como se observa en la figura 14.

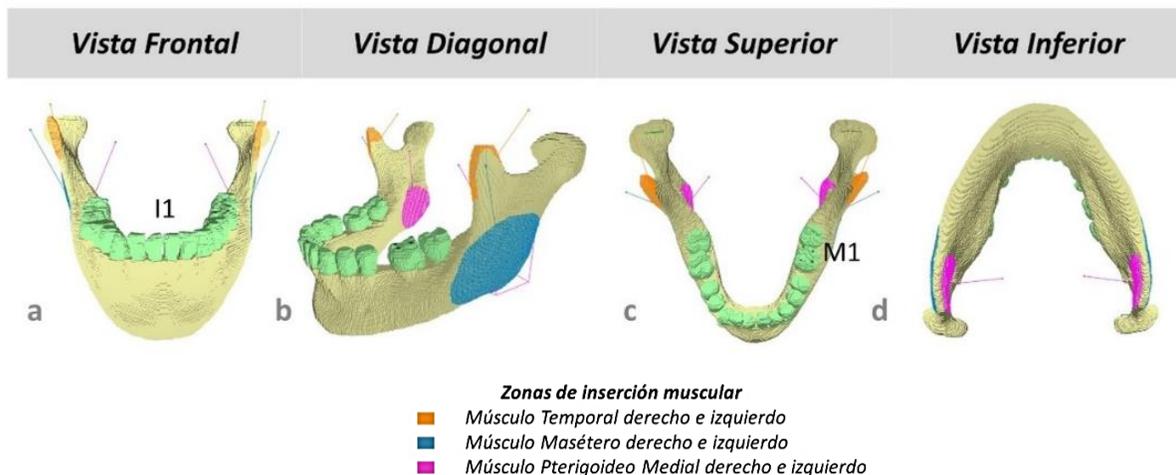


Figura 14. Modelo de elementos finitos.

Modelo con elementos cuboidales de ocho nodos. La mandíbula y los dientes son materiales a los cuales se asignan propiedades físicas diferentes; las zonas de inserción muscular se delimitan por separado, y se pueden observar los vectores de fuerza que se originan desde el centro de masa de cada músculo en el cráneo, en dirección hacia su inserción mandibular.

Cada músculo ejerce una fuerza específica, igual para los 5 individuos. Se definen restricciones cinemáticas sobre el borde incisal de los incisivos centrales inferiores (I1, imagen a), sobre las cuatro cúspides del primer molar inferior izquierdo (M1, imagen c), y en la superficie anterior de ambas cabezas mandibulares.

La evaluación de resultados se realizó mediante mapas de contornos con escalas de colores (Figuras 15 y 16), en la que las zonas de alta microdeformación se representan en rojo, las zonas de moderada microdeformación en verde y las de baja, en azul. Los mapas expresaron de las microdeformaciones globales sufridas por los modelos, sus cambios de tamaño y de forma, y las fuerzas de reacción oclusales y articulares que se registraron al ser cargados. Gracias a estos resultados fue posible la comparación cualitativa y cuantitativa de la respuesta mecánica de las mandíbulas de los individuos analizados.

Tabla 3. Datos de los modelos de elementos finitos.

Individuo	Tamaño de Vóxeles de las TC (mm)	Fuerza de cada músculo temporal (N)	Fuerza de cada músculo masétero (N)	Fuerza de cada músculo pterigoideo medial (N)
Individuo 1 Carga Intensa	0,32 x 0,32 x 0,32	200	200	150
Individuo 2 Carga Moderada	0,40 x 0,40 x 0,40	200	200	150
Individuo 3 Carga Leve	0,43 x 0,43 x 0,43	200	200	150
Individuo 4 <i>C. Alterada Clase II</i>	0,40 x 0,40 x 0,40	200	200	150
Individuo 5 <i>C. Alterada Clase III</i>	0,40 x 0,40 x 0,40	200	200	150

7. RESULTADOS

En términos generales, los resultados que se observaron en los mapas de contornos de colores no mostraron grandes diferencias en la respuesta mecánica mandibular entre los individuos analizados, si bien se pudo observar que las diferencias fueron mayores en cuanto a la intensidad de las microdeformaciones que a su distribución, donde se observaron diferencias menos marcadas.

Independiente del tipo de carga, hay zonas que normalmente sufren microdeformaciones durante la masticación, tales como las áreas vecinas a los puntos de aplicación de las fuerzas o los territorios óseos correspondientes a las inserciones musculares (Figura 16).

Con respecto a la intensidad, se observó que los individuos de carga masticatoria intensa y moderada tuvieron microdeformaciones semejantes entre sí, y se acercaron a aquellas sufridas por el individuo clase III, siendo los individuos de carga masticatoria blanda de clase I y II aquellos que presentaron

zonas más extensas de microdeformación. Por su parte, la distribución de las microdeformaciones también mostró cierta cercanía entre los individuos arqueológicos y el de clase III, siendo este último el que más difirió entre los individuos de carga leve, y en la muestra en general. Para facilitar la observación de los resultados, las diferencias fueron analizadas según el escenario de carga aplicada -de incisión o masticación-, como se muestra en las Figuras 15 y 16.

7.1 Escenario de Incisión: carga en los incisivos centrales inferiores

Como se observa en la Figura 15, durante la Incisión, los resultados relativos a la magnitud de las microdeformaciones fueron más significativos que aquellos referentes su distribución, que de igual forma mostraron diferencias, sobre todo en relación a los individuos de carga leve clase I y II. Los resultados de estos últimos permitieron observar una respuesta mecánica mayor, en la que las zonas de microdeformación se extendieron desde la rama mandibular hacia la zona anterior del cuerpo, donde se acrecentaron por sobre el mentón, en el área correspondiente al reborde alveolar vestibular de los incisivos. En la zona apical a los incisivos centrales por lingual, la tendencia fue la misma que por vestibular, aunque menos marcada. En el individuos clase II específicamente, la deformación fue más alta en esta zona apical a la carga, y se extendió hacia distal bilateralmente, abarcando incluso el reborde alveolar relativo a los caninos y premolares, es decir, las microdeformaciones se expandieron afectando a la zona anterior del cuerpo mandibular, en su porción media. En el individuo clase I, en cambio, si bien se observó gran deformación en esta zona, los resultados indicaron que ésta no se extendió tanto como en el individuo clase II.

Observando las características de la distribución en términos generales, en todos los individuos fueron relativamente simétricas con relación al plano mediano, y se extendieron principalmente en la zona anterior y posterior de la rama mandibular, desde el proceso coronoides hasta la zona retromolar, siguiendo el eje mayor de la rama, y por distal, desde el proceso condilar en su porción anterior, hasta el ángulo mandibular como límite inferior. Cabe destacar que se observó que en los

individuos de carga masticatoria alta, moderada y clase III, muy similares en todo aspecto, los procesos coronoides se vieron menos afectados por la carga. Otra diferencia notoria en estos individuos fue que las microdeformaciones de la rama no se extendieron hacia anterior más allá de la zona retromolar, como ocurrió con los otros dos.

Resumiendo, y analizando los resultados desde una perspectiva panorámica, se observó que aquellos individuos que ejercen mayores cargas masticatorias mostraron resultados semejantes entre sí y con el individuo clase III, siendo los individuos de carga leve clase I y II los que se alejaron del resto. Entre éstos últimos, las diferencias en magnitud de microdeformaciones -mayores en el clase II-, derivaron en una leve diferencia de distribución, dado que las zonas más comprometidas se extendieron en este individuo; sin embargo, no se mostraron zonas independientes, separadas de las anteriores, que hubieran sido afectadas por las cargas. Finalmente, los resultados de la respuesta mecánica del individuo de carga masticatoria moderada alteraron el orden de los resultados generales, ya que se mostró que este individuo sufrió menor deformación, en términos generales, que aquel de carga masticatoria intensa, que las áreas de mayor magnitud fueron más limitadas.

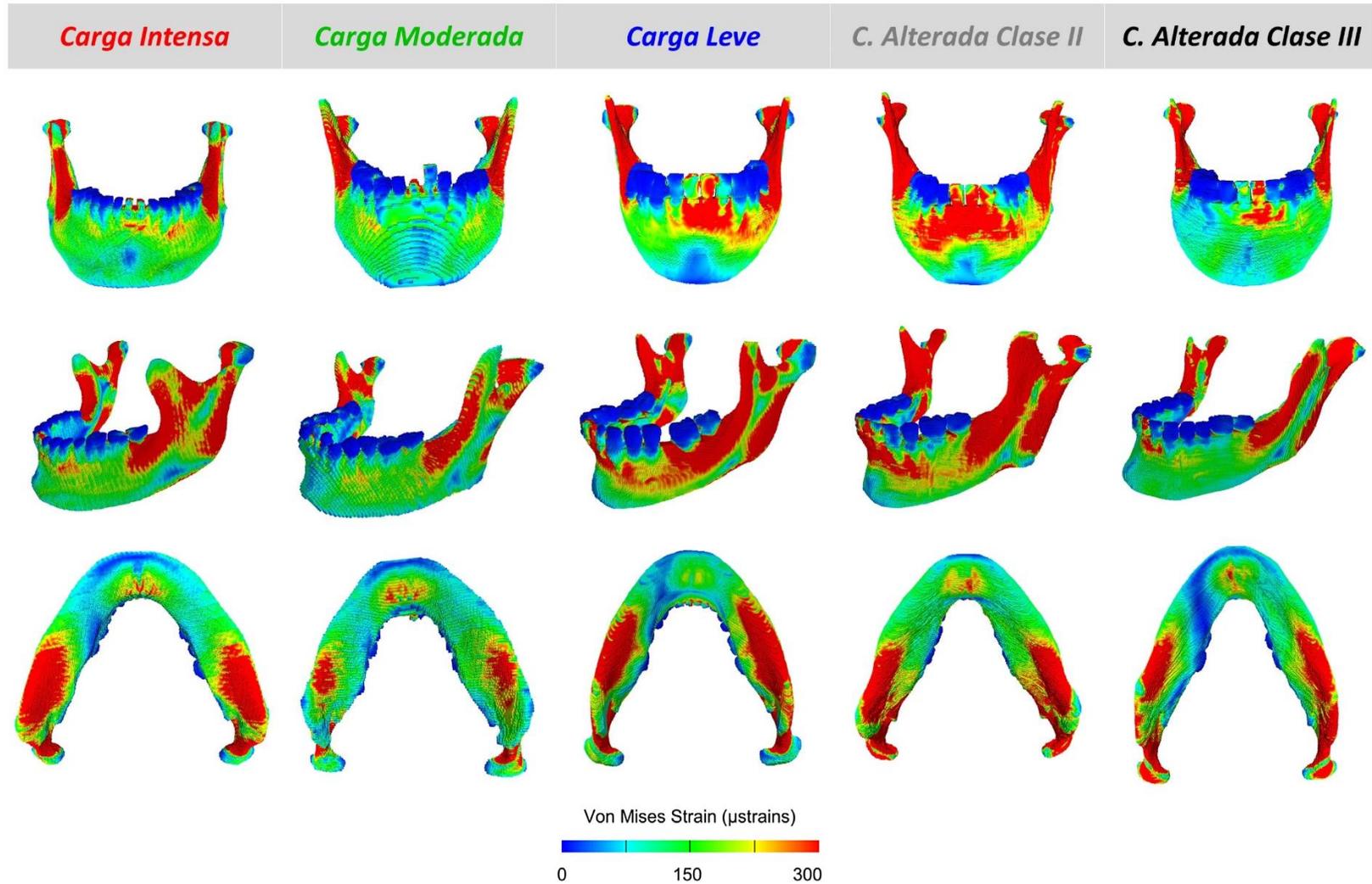


Figura 15. Diagramas de contorno de colores durante la Incisión.

Las mandíbulas se aprecian desde una visión frontal, oblicua e inferior. Las zonas de alta microdeformación se observan en rojo, en verde las de moderada y en azul las de baja.

7.2 Escenario de Masticación: carga en el primer molar inferior izquierdo

Durante la masticación, representada en los diagramas de la Figura 16, los resultados mostraron contrastes más notorios en la magnitud que en la distribución de las microdeformaciones. En este caso, sin embargo, en general se advirtió que las zonas comprometidas no eran simétricas con respecto al plano mediano, como ocurrió en el escenario anterior, siendo el lado de balance (lado derecho), el que sufrió microdeformaciones más amplias en superficie. Nuevamente se observó que, entre los individuos de dieta blanda, aquél que más difirió del grupo fue el de carga alterada clase III, cuya magnitud de microdeformación general fue semejante a la que presentaron los de carga intensa y moderada. En este escenario, sin embargo, se pudo notar que en la distribución de las microdeformaciones hubo cierta semejanza entre los individuos arqueológicos y el de clase II -aunque con distintas intensidades-, ya que estos tres tuvieron en común el compromiso de la zona anterior del cuerpo mandibular, en el área comprendida entre el reborde alveolar de los dientes anteroinferiores y el mentón, principalmente en el lado de balance. Los individuos de carga leve clase I y el de carga alterada clase III no mostraron grandes microdeformaciones en ese territorio (ver vista frontal en Figura 16). Por su parte, al considerar la magnitud de las microdeformaciones, fue notoria la semejanza entre la respuesta de los individuos de carga leve y alterada clase II. Éstos presentan extensas áreas de alta magnitud de microdeformaciones en el lado de trabajo, en la parte anterior de la rama mandibular, iniciándose en el proceso coronoides, pasando por la zona retromolar y extendiéndose con menor intensidad hacia el cuerpo mandibular, en el territorio relativo a la línea oblicua externa, manteniéndose paralelas al eje mayor de la rama. Cabe destacar que en los individuos arqueológicos la magnitud de las microdeformaciones fue considerablemente menor que en los demás, seguidos por el individuo de carga alterada clase III, y con significativa diferencia por los de la clase I y II, que, si bien fueron los que más se alejaron del resto en este aspecto, las diferencias fueron comparativamente menor al que se evidenció

durante la carga en los incisivos. Otra disparidad con los resultados de la incisión, es el hecho de que las microdeformaciones sufridas por el hueso inmediatamente próximos a los dientes cargados es inferior en el escenario de masticación: el reborde alveolar correspondiente a los primeros molares inferiores sufre baja intensidad de microdeformación, muy por debajo de la sufrida por el reborde de los incisivos durante la carga incisiva. Un aspecto en común que se hizo notorio durante la masticación y la incisión, fue que el individuo de carga moderada tendió a mostrar zonas menos extensas de intensidad alta de microdeformación que el de carga intensa, particularmente en la superficie interna del ángulo mandibular y el borde posterior de la rama.

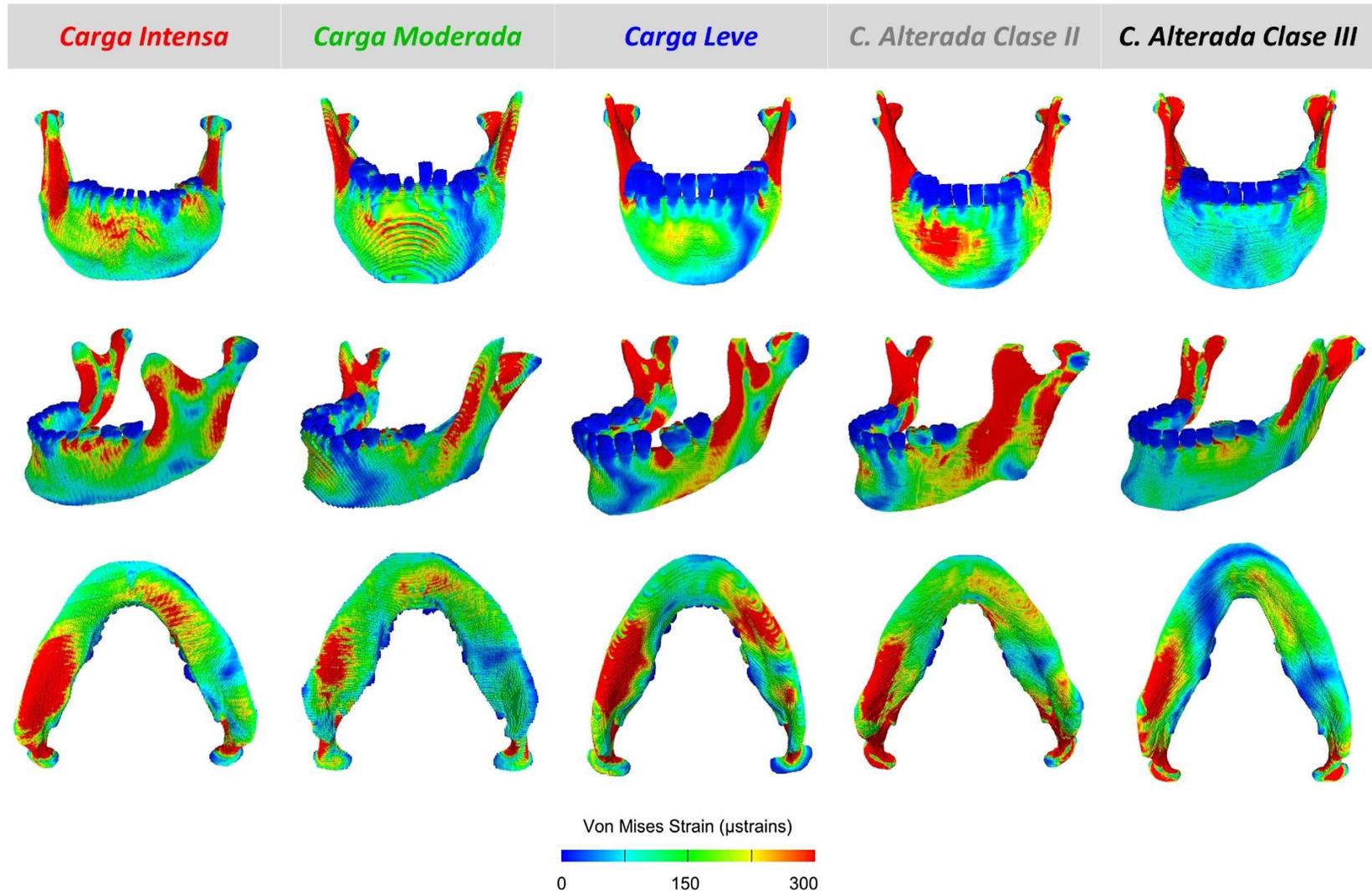


Figura 16. Diagramas de contorno de colores durante la Masticación.

Las mandíbulas se aprecian desde una visión frontal, oblicua e inferior. Las zonas de alta microdeformación se observan en rojo, en verde las de moderada y en azul las de baja.

8. DISCUSIÓN

El estudio de la influencia ejercida por factores ambientales sobre la morfología ósea humana ha sido foco de interés reciente de variadas investigaciones, pero se mantiene como un campo con gran potencial de aplicación todavía inexplorado. En el presente trabajo de investigación el centro de interés se orientó a la evaluación de la influencia de la carga masticatoria requerida por un determinado tipo de economía de subsistencia en una población, con su morfología ósea mandibular. Para ampliar nuestro conocimiento en esta materia, se pretendió evaluar las diferencias en la respuesta mecánica de mandíbulas pertenecientes a individuos que ejercen distintos tipos de carga y que poseen relación máxilomandibular diferente, centrándonos en su ubicación y magnitud. Para hacerlo se utilizaron herramientas y técnicas de análisis computacionales de tecnología avanzada, lo que nos permitió obtener resultados fácilmente interpretables -expresados bajo la forma de mapas de contorno de colores-, que permitieran comparar la respuesta mecánica de las mandíbulas para poner a prueba la hipótesis de que las poblaciones con intensidad de carga masticatoria y relación máxilomandibular distinta, presentan diferencias en la respuesta mecánica mandibular frente a las fuerzas musculares, oclusales y articulares generadas durante la oclusión.

Es así como para el desarrollo del estudio fueron utilizadas técnicas de reconstrucción tridimensional de las mandíbulas a partir de sus tomografías computarizadas, que posteriormente fueron convertidas en mallas de elementos finitos y sometidas a cargas masticatorias simuladas que representaron de modo independiente dos escenarios comunes durante la ingesta alimentaria: incisión y masticación.

Los resultados de nuestra investigación confirmaron parcialmente la hipótesis, dado que las expectativas iniciales se cumplieron en su mayoría, existiendo algunos aspectos que se alejaron de las suposiciones originales.

En un análisis global de los resultados obtenidos, se observa que en general las

zonas de mayor microdeformación fueron las zonas de inserción muscular, el pilar coronoideo, pilar condilar y arco basal de la mandíbula, los procesos condilares y el territorio óseo inmediatamente próximo a los dientes cargados.

Uno de los primeros resultados cuya observación resultó notoria, fue la diferencia en la simetría respecto del plano mediano que se da en la distribución de las microdeformaciones entre ambos escenarios de carga. Cuando la carga se aplicó sobre los incisivos, las áreas de alta microdeformación fueron bilaterales y fundamentalmente homogéneas, al contrario de lo que ocurrió en el segundo caso. Esto puede explicarse porque cuando la fuerza se aplica sobre una estructura mediana, los músculos masticatorios de ambos lados tienen un comportamiento semejante, ejerciendo una acción coordinada y bilateral, sin la presencia de una restricción cinemática unilateral. Caso contrario es el que se da cuando se carga el primer molar inferior izquierdo: es este contexto, que es el que se da con mayor frecuencia en una situación real de masticación, el contacto es unilateral, por lo que se producen diferencias entre el lado de trabajo y balance. Estas diferencias fueron claras en los modelos en masticación, donde se observó que el lado de balance sufrió mayor cantidad de microdeformaciones en la rama, proceso condilar y ángulo mandibular que el lado de trabajo. Esto podría explicarse por el hecho que, en ese lado, no existe una restricción que intervenga limitando el movimiento (como lo es la carga molar en el lado de trabajo), que por la acción de los músculos masticatorios elevadores se mantiene aun cuando del lado contrario el movimiento ya se haya detenido, por lo que ejercen tensión sobre las zonas de inserción, generando una distorsión local mayor del cuerpo en los tres ejes del espacio, dado que se sabe que durante la contracción, los músculos tensan directamente el hueso donde insertan y aplican cargas (Toro-Ibacache et al., 2016). Esto tiene relación con los movimientos y tensiones mandibulares que describe Gröning (Gröning et al., 2011), en su investigación acerca de las cargas que se ejercen en la zona de la sínfisis, y cómo éstas derivan en un movimiento de deformación de todo el cuerpo óseo.

Otro evento que resaltó y fue común a los dos escenarios de carga, fue la semejanza en la magnitud de la respuesta de los individuos de carga leve y alterada clase II, y su distanciamiento del resto. Posiblemente la razón de esta característica sea la

conformación ósea más pequeña y grácil que caracteriza a estos individuos, en contraste con los rasgos de las mandíbulas pertenecientes a individuos que ejercen cargas intensas y moderadas, que se ha descrito que tienden a ser robustas, principalmente en la rama y cuerpo mandibular, con amplias zonas de inserción muscular, en el cuerpo mandibular y proceso coronoides (Ugarte, 2017). Tal como se observó la similitud de los individuos de carga leve y clase II, y su disparidad con el resto, resaltó la semejanza en la respuesta de los de carga intensa y moderada. Un factor que podría explicar la similitud morfológica entre estos individuos es el hecho de que provienen de poblaciones con una ancestría común amerindia (Rothhammer et al., 2009), en comparación con la población actual, cuya ancestría es mixta con un alto componente europeo (Fuentes et al., 2014; Valenzuela-Yuraidini et al., 1987).

Se suma a esto la posible incidencia de un tercer componente que podría estar influyendo en la paridad en la respuesta del individuo de carga masticatoria intensa y el de moderada, y es que aunque a las estrategias de subsistencia “cazadora-recolectora” y “agro-alfarera” se les ha asignado tradicionalmente alimentos duros y blandos respectivamente (González-José et al., 2005; Von Cramon-Taubadel, 2011), ambas poblaciones tienen una dieta comparativamente más dura/resistente respecto de la población moderna, y estarían así sujetas a mayor estrés masticatorio. En la misma lógica, siempre es posible que ambos tipos de dieta tengan elementos en común del punto de vista de las propiedades materiales de los alimentos (Ugarte, 2017). Dicho lo anterior, sigue siendo un resultado inesperado que la respuesta mecánica del individuo de carga intensa pareciese ser muy similar a la del individuo de carga moderada, el que según nuestras expectativas debió haber demostrado un nivel de afectación mayor frente a las fuerzas. Se requieren futuros análisis para dilucidar la razón de este hallazgo, pero existe la opción de que haya dos grandes factores interactuando en este proceso: el primero tiene relación con la muestra, puesto que estudios actuales hacen que nos inclinemos a pensar que existe mayor variabilidad poblacional y de ancestría en la muestra de donde fue extraído el esqueleto del individuo de carga moderada, Pica 8 (Retamal et al., 2012; Santana-Sagredo et al., 2017). Si bien no se tiene claridad aún sobre este factor, podría tener

relación con los resultados obtenidos. Además, es posible que la aparente menor deformación de los individuos de carga moderada, se deba más bien a una distribución levemente desigual a aquella del individuo de carga intensa: desde una vista inferior, el borde basilar y el ángulo mandibular de este último, tanto en incisión como masticación, se ven más ampliamente deformados, y las microdeformaciones en general tienden a cubrir territorios más delimitados, confinándose a zonas muy específicas y disipándose rápidamente. Lo anterior podría estar expresando un patrón de microdeformación característico de los individuos cazadores-recolectores, en los que la morfología mandibular se ha descrito como más “larga y estrecha” que los agricultores (Von Cramon-Taubadel, 2011), -sin ser menos robusta-, pero difiriendo de manera significativa respecto a la de poblaciones agricultoras, caracterizándose estas últimas por una anatomía más grácil comparativamente, sobre todo en cuerpo y rama mandibular, con ramas mandibulares menos divergentes, de mayor longitud, menor diámetro y mayor ángulo goníaco (Galland et al., 2016). Dado esto, finalmente la estructura más “cuadrada y maciza” de la mandíbula del individuo de carga intensa, con ángulos más cerrados y una mayor perpendicularidad entre sus partes, hace que las cargas se distribuyan de forma más uniforme y directa, construyendo una trayectoria más recta hacia inferior durante su disipación, y afectando en menor medida a las zonas no inmediatamente vecinas al área donde son ejercidas.

A modo de resumen la respuesta mostrada por los individuos de carga intensa y moderada, coincide parcialmente con lo esperado, en el sentido que se cumple la predicción de que su anatomía robusta, con un cuerpo mandibular acortado y de mayor grosor, corresponde a una anatomía optimizada para reducir el estrés mecánico en sentido vertical y disminuir las flexiones del cuerpo mandibular en sentido sagital y horizontal (Van Eijden, 2000). Además analizando desde el punto de vista biomecánico y puntos de aplicación de las fuerzas, en el plano sagital, si consideramos la inserción del masetero como el punto de aplicación de fuerza y el primer molar o incisivos como puntos máximos de los vectores de resistencia, y a las ATM como fulcrum (Ugarte, 2017), se observa que el brazo de palanca ejercido es más favorable que en las poblaciones con carga leve, con un brazo de potencia

mayor y la tendencia a disminuir el brazo de resistencia (distancia cóndilo-incisiva) (Van Eijden, 2000). Esto se reduce al hecho de que estos individuos presentaban características morfológicas que los hacían más biomecánicamente aptos para recibir grandes cargas sufriendo una menor microdeformación.

Para continuar con el análisis de los resultados obtenidos, centramos la atención en el individuos clase III, que tanto en incisión como en masticación tuvo una respuesta mecánica más semejante a los individuos arqueológicos que a los de carga leve y alterada clase II: la magnitud de sus deformaciones fue, en general, significativamente inferior a la de estos últimos. Una de las posibles causas radica en la morfología también robusta y fuerte que éste posee. Si bien se advirtieron mayores microdeformaciones cuando se cargaron los centrales que el primer molar, éstas fueron siempre de magnitud inferior a los demás individuos de carga leve, y con una distribución más acotada, lo que constituye un resultado inesperado considerando que en la zona anterior del cuerpo los individuos de clase III no suelen soportar fuerzas, puesto que no es una zona de oclusión por la posición relativa del maxilar y la mandíbula, lo que hace que sea localmente un área específica de baja resistencia, con hueso atrófico que no está estimulado constantemente. Este fenómeno puede deberse a que, aunque la zona anterior mandibular de un individuo clase III tiene todas las características mencionadas, sigue teniendo un mayor ancho vestíbulo-palatino y un mentón prominente, con una dimensión transversal incrementada y con mayor masa ósea, que podría favorecer la disipación efectiva de las cargas, aun cuando esa no sea una acción que desenvuelve usualmente; esto se apoya en observaciones de la literatura y en las conclusiones de estudios actuales referentes al papel que ejerce la presencia del mentón en la funcionalidad mandibular (Gröning et al., 2011; Hylander, 1984, 1985; Hylander et al., 1985). Además, la mayor cantidad de microdeformaciones en el escenario de incisión fue universal a todos los individuos: durante la carga molar, la mandíbula está recibiendo cargas potentes en la zona que está biomecánicamente preparada para hacerlo, independiente del tipo de economía de subsistencia o de la relación máxilomandibular, puesto que en todo tipo de individuo los molares son los dientes cuya anatomía y función radica en la recepción de fuerzas de alta magnitud ejercidas

en sentido vertical, teniendo raíces, una anatomía oclusal y un eje apropiados para recibirlas. Los dientes anteroinferiores carecen de esas características, debido a que están destinados a cumplir la función de corte, y no de masticación. Por lo mismo, su eje con relación al plano oclusal no es perpendicular, ya que en el plano sagital posee una inclinación que va de posterior hacia anterior, y de inferior hacia superior, quedando ligeramente por fuera de la cresta alveolar, lo que deriva en una descomposición de las fuerzas cuando éstas se ejercen de forma perpendicular al plano oclusal, y a la generación de palancas que hacen que éstos no estén adecuados a la recepción de grandes cargas verticales, y que se produzcan mayores microdeformaciones en el hueso adyacente cuando esto sucede. A esto se suma la zona de mayor resistencia en la que se inserta el primer molar inferior, cuya morfología permite una mejor disipación de las cargas, puesto que es un área de mayor longitud vestibulo lingual, con corticales gruesas y con la presencia de las líneas oblicuas internas y externas, hacia inferior del límite apical del diente.

En definitiva, podemos deducir que en su mayoría los resultados obtenidos son coincidentes con la expectativa que se tenía, ya que se cumplió un alto porcentaje de las predicciones. Hacen falta, sin embargo, sucesivos estudios para indagar en mayor medida la influencia del factor ambiental ligado a la economía de subsistencia, en la morfología mandibular y su respuesta mecánica ante el estrés físico. La dilucidación del modo en que el medio incide en la morfología mecánica mandibular, y en qué porcentaje éste juega un rol en su determinación anatómica, proporcionaría el conocimiento necesario para comenzar a comprender el origen de múltiples patologías o condiciones de alta prevalencia en la actualidad, como maloclusiones, apiñamiento dentario y discrepancia de forma y tamaño entre las estructuras duras orales, para dibujar a futuro nuevas estrategias de intercepción y tratamiento con base científica.

Si bien sabemos que existen varios componentes a la hora de determinar la morfología ósea, entre las cuales se cuentan la ancestría, la adaptación y la funcionalidad, con este estudio pudimos observar que en mandíbula, tal como se describe en la literatura, la actuación de las fuerzas masticatoria exigidas por la estrategia de subsistencia de una población cumple un papel significativo, al parecer

mayor que en el macizo craneofacial, donde a su vez es mayor que en otros huesos del cuerpo humano (trabajo en progreso de la tesis de Francisca Vidaurre, Facultad de Odontología, Universidad de Chile). Esto fue posible gracias al uso de las metodologías de vanguardia que, aunque ya tienen hace tiempo numerosas aplicaciones en otros ámbitos del conocimiento, no han extendido ampliamente su uso en el campo de la odontología, constituyendo herramientas con un alto potencial de aporte. Al mismo tiempo, una de las restricciones que se nos presentó fue la de tener una muestra reducida debido a la complejidad del proceso de generación de los modelos y su resolución, lo que constituye un obstáculo intrínseco al uso de herramientas de uso complejo, y que derivó en la generación de resultados que no pueden extrapolarse de manera directa a la población total, porque no representan un número significativo de casos sobre el cual puedan desarrollarse análisis estadísticos. Además de ello, las muestras pertenecen a grupos poblacionales con rasgos de ancestría determinados, y por lo mismo, vale destacar que no puede predecirse que el comportamiento mecánico presentado por los individuos vaya a ser igual en todos los casos que reúnan características de carga masticatoria similares, pero si podemos tener una idea general de un posible desenlace. Sin embargo, los resultados del análisis de elementos finitos de la mandíbula son bastante conservados en lo general en humanos e incluso otros primates (Richmond et al., 2005; Strait et al., 2005; Toro-Ibacache, 2013; Toro-Ibacache et al., 2016a, 2016b), lo que sugiere una robustez de la técnica en generar resultados que son aplicables al concluir patrones generales de respuesta mecánica ósea. El enfoque de esta investigación era el de generar modelos en base a muestras representativas de poblaciones más grandes, para poder hacernos una idea de la respuesta mecánica de la mandíbula de distintos individuos diferentes entre sí, por lo cual las limitaciones mencionadas no constituyeron un problema.

Se espera que a futuro se desarrollen nuevos estudios relacionados con la línea investigativa que tiene el presente proyecto, para ampliar nuestras perspectivas a la hora de desarrollar nuevas estrategias para comprender las causas de las patologías y ponderar lineamientos viables para su prevención o corrección, ya sea en el terreno de la cirugía, la ortodoncia, la odontopediatría, la rehabilitación, la

implantología, o cualquier dominio que requiera una comprensión más completa de los mecanismos y la forma en que la morfología ósea se ve afectada por la función.

9. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos y su discusión, se plantean las siguientes conclusiones:

- La respuesta mecánica mandibular ante cargas difiere entre individuos con carga masticatoria distinta según su estrategia de subsistencia, pero las diferencias son menores a menos que se considere agrupar en un extremo a los individuos de Carga Masticatoria Intensa y Moderada, y en otro a los individuos actuales con Carga Leve y Alterada Clase II, con una morfología más débil y una respuesta más intensa. El individuo de Carga Alterada Clase III se asociaría al primer grupo, porque su morfología mandibular robusta determina una respuesta semejante a la de ellos.
- En términos globales, las zonas de mayor o menor microdeformación son constantes entre los individuos.
- Se necesita ampliar la investigación para determinar con precisión la diferencia en la respuesta mecánica mandibular que pueda existir entre individuos de Carga Masticatoria Intensa y Moderada.
- Si bien hay varios factores que definen la morfología ósea, se observa que la función es determinante en la mandíbula, con mayor injerencia que en los demás huesos del viscerocráneo, teniendo una elevada plasticidad fenotípica. De todos modos, serían necesarios posteriores investigaciones para ahondar en el conocimiento del grado más exacto en el que los factores juega un rol en este aspecto.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrawal, K., Lucas, P., Bruce, I., & Prinz, J. (1998). Food Properties that influence Neuromuscular Activity during Human Mastication. *Journal of Dental Research*, 77(11), 1931-1938.
- Barbeito-Andrés, J. O., Pucciarelli, H. M., & Sardi, M. L. (2011). An ontogenetic approach to facial variation in three Native American populations. *Journal of Comparative Human Biology*, 62(1), 56-67.
- Beaupré, G., Orr, T., & Carter, D. (1990a). An approach for time-dependent bone modeling and remodeling—application: A preliminary remodeling simulation. *Journal of Orthopaedic Research*, 8(5), 662-670.
- Beaupré, G., Orr, T., & Carter, D. (1990b). An approach for time-dependent bone modeling and remodeling—theoretical development. *Journal of Orthopaedic Research*, 8(5), 651-661.
- Bernal, V., Perez, S. I., & Gonzalez, P. N. (2006). Variation and causal factors of craniofacial robusticity in Patagonian hunter-gatherers from the late Holocene. *American Journal of Human Biology*, 18(6), 748-765.
- Borrero, L. A. (1999). The prehistoric exploration and colonization of Fuego-Patagonia. *Journal of World Prehistory*, 13(3), 321-355.
- Carlson, D. S., & Van Gerven, D. P. (1977). Masticatory function and post-Pleistocene evolution in Nubia. *American Journal of Physical Anthropology*, 46(3), 495-506.
- Corruccini, R. S. (1984). An epidemiologic transition in dental occlusion in world populations. *American journal of orthodontics*, 86(5), 419-426.
- Corruccini, R. S., & Whitley, L. D. (1981). Occlusal variation in a rural Kentucky community. *American journal of orthodontics*, 79(3), 250-262.
- Daegling, D. J., & Grine, F. E. (1991). Compact bone distribution and biomechanics of early hominid mandibles. *American Journal of Physical Anthropology*, 86(3), 321-339.
- Drake, R. L., Vogl, A. Wayne, M. Mitchell, Adam W. (2010). *Gray. Anatomía para Estudiantes*. (2010 ed.). Travessera de Gracia, Barcelona - España: Elsevier España.
- Enlow, D. (1990). *Facial growth* Philadelphia: WB Saunders.

- Ethier, C. R., Simmons, C. A. (2007). *Introductory biomechanics: from cells to organisms*. Cambridge University Press.
- Eyquem, A. (2018). *Efecto de la intensidad masticatoria en la forma craneal en poblaciones arqueológicas y modernas de Chile y Argentina*. (Título Profesional de Antropología con mención en Antropología Física), Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Fagan, M. J., Curtis, N., Dobson, C. A., Karunanayake, J. H., Kitpczik, K., Moazen, M., et al. (2007). *Voxel-based finite element analysis-working directly with microCT scan data*. Paper presented at the Journal of Morphology.
- Farias-Gomes, S. G. C., William; Moura Jufer, Juliana Silva; Del Bel Cury, Altair Antoninha; Rodrigues Garcia, Renata Cunha Matheus. (2010). Correlation of mastication and masticatory movements and effect of chewing side preference. *Brazilian Dental Journal*, 21(4), 351-355.
- Felsenthal, N., & Zelzer, E. (2017). Mechanical regulation of musculoskeletal system development. *Development*, 144(23), 4271-4283.
- Fitton, L., Shi, J., Fagan, M., & O'higgins, P. (2012). Masticatory loadings and cranial deformation in *Macaca fascicularis*: a finite element analysis sensitivity study. *Journal of Anatomy*, 221(1), 55-68.
- Fitton, L. C., PrôA, M., Rowland, C., Toro-ibacache, V., & O'higgins, P. (2015). The impact of simplifications on the performance of a finite element model of a *Macaca fascicularis* cranium. *The Anatomical Record*, 298(1), 107-121.
- Frost, H. M. (1987). Bone "mass" and the "mechanostat": a proposal. *The Anatomical Record*, 219(1), 1-9.
- Fuentes, M., Pulgar, I., Gallo, C., Bortolini, M.-C., Canizales-Quinteros, S., Bedoya, G., et al. (2014). Geografía génica de Chile: Distribución regional de los aportes genéticos americanos, europeos y africanos. *Revista médica de Chile*, 142(3), 281-289.
- Fukase, H. (2007). Functional significance of bone distribution in the human mandibular symphysis. *Anthropological Science*, 115(1), 55-62.
- Galland, M., Van Gerven, D. P., Von Cramon-Taubadel, N., & Pinhasi, R. (2016). 11,000 years of craniofacial and mandibular variation in Lower Nubia. *Scientific reports*, 6, 31040.
- Godinho, R. M. (2016). *Recent Hominin Cranial Form and Function*. (PhD in Medical Sciences), University of York, United Kingdom.
- 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.
- Gröning, F., Liu, J., Fagan, M. J., & O'Higgins, P. (2011). Why do humans have chins? Testing the mechanical significance of modern human symphyseal morphology with finite element analysis. *American journal of physical anthropology*, 144(4), 593-606.
- Huiskes, R., Ruimerman, R., Van Lenthe, G. H., & Janssen, J. D. (2000). Effects of mechanical forces on maintenance and adaptation of form in trabecular bone. *Nature*, 405(6787), 704.
- Hutchinson, E. F., Farella, M., Hoffman, J., & Kramer, B. (2017). Variations in bone density across the body of the immature human mandible. *Journal of Anatomy*, 230, 679-688.
- Hylander, W. L. (1984). Stress and strain in the mandibular symphysis of primates: a test of competing hypotheses. *American Journal of Physical Anthropology*, 64(1), 1-46.
- Hylander, W. L. (1985). Mandibular function and biomechanical stress and scaling. *American Zoologist*, 25(2), 315-330.
- Hylander, W. L., & Johnson, K. R. (1985). Temporalis and masseter muscle function during incision in macaques and humans. *International journal of primatology*, 6(3), 289-322.
- Ingber, D. E. (2003). Mechanobiology and diseases of mechanotransduction. *Annals of Medicine*, 35(8), 564-577.
- Ingber, D. E. (2006). Cellular mechanotransduction: putting all the pieces together again. *The FASEB Journal*, 20(7), 811-827.
- Kelly, R. L. (1983). Hunter-gatherer mobility strategies. *Journal of anthropological research*, 39(3), 277-306.
- Kjær, I., Keeling, J. W., & Hansen, B. F. (2000). The Prenatal Human Cranium—Normal and Pathologic Development (1999). In.
- Koolstra, J. H. (2002). Dynamics of the human masticatory system. *Critical reviews in oral biology & medicine*, 13(4), 366-376.
- Kupczik, K. (2008). Virtual biomechanics: basic concepts and technical aspects of finite element analysis in vertebrate morphology. *Journal of Anthropological Sciences*, 86(4), 193-198.

- Kupczik, K., Dobson, C., Crompton, R., Phillips, R., Oxnard, C. E., Fagan, M., et al. (2009). Masticatory loading and bone adaptation in the supraorbital torus of developing macaques. *American Journal of Physical Anthropology*, 139(2), 193-203.
- Kupczik, K., Dobson, C., Fagan, M., Crompton, R., Oxnard, C., & O'Higgins, P. (2007). Assessing mechanical function of the zygomatic region in macaques: validation and sensitivity testing of finite element models. *Journal of Anatomy*, 210(1), 41-53.
- Lanata, J., Martino, L., Osella, A., & Garcia-Herbst, A. (2008). Ambiente y demografía durante la dispersión humana inicial en Sudamérica. In C. E. López & G. A. Ospina (Eds.), *Ecología histórica: interacciones sociedad-ambiente en distintas escalas espacio temporales*. Dosquebradas: Postergraph.
- Latarjet, M. L., Alfredo Ruiz. (2004). *Anatomía Humana* (Vol. 2): Editorial Médica Panamericana.
- Lieberman, D. E. (2011). *The Evolution of the Human Head*: Harvard University Press.
- Lieberman, D. E., Krovitz, G. E., Yates, F. W., Devlin, M., & Claire, M. S. (2004). Effects of food processing on masticatory strain and craniofacial growth in a retrognathic face. *Journal of human evolution*, 46(6), 655-677.
- Liu, J., Shi, J., Fitton, L. C., Phillips, R., O'Higgins, P., & Fagan, M. J. (2012). The application of muscle wrapping to voxel-based finite element models of skeletal structures. *Biomechanics and modeling in mechanobiology*, 11(1-2), 35-47.
- Macho, G. A., Shimizu, D., Jiang, Y., & Spears, I. R. (2005). Australopithecus anamensis: A finite-element approach to studying the functional adaptations of extinct hominins. *The Anatomical Record*, 283(2), 310-318.
- Meikle, M. C. (2002). *Craniofacial Development, Growth, and Evolution*. Norfolk - England: Bateson Publishing.
- Meruane, M., Smok, C., & Rojas, M. (2012). Face and neck Development in Vertebrates. *International Journal of Morphology*, 30(4), 1373-1388.
- Monteiro, C. A., Levy, R. B., Claro, R. M., Castro, I. R. R. d., & Cannon, G. (2010). A New Classification of Foods Based on the Extent and Purpose of their Processing. *Cadernos de saude publica*, 26(11), 2039-2049.
- Moore, K. L., Dalley II, Arthur F. (2007). *Anatomía con Orientación Clínica* (2007 ed.). Hegel N° 141, 2° piso, Colonia Chapultepec Morales, D.F. - Mexico:

Editorial Médica Panamericana.

- Morales, C. (2018). *Morfología de la sección transversal mandibular en poblaciones actuales y arqueológicas que ejercen distintas intensidades de cargas masticatorias de acuerdo a su dieta*. (Trabajo de investigación requisito para optar al título de cirujano dentista), Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Moss, M. L. (1968). A theoretical analysis of the functional matrix. *Acta Biotheoretica*, 18(1), 195-202.
- Moss, M. L. (2007). The differential roles of periosteal and capsular functional matrices in orofacial growth. *The European Journal of Orthodontics*, 29(suppl 1), i96-i101.
- Moyers, R. E. (1992). *Manual de Ortodoncia*. Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana.
- Mullender, M., Huiskes, R., & Weinans, H. (1994). A physiological approach to the simulation of bone remodeling as a self-organizational control process. *Journal of Biomechanics*, 27(11), 1389-1394.
- Nanci, A. (2013). *Ten Cate's Oral Histology: Development, Structure, and Function*. (8th ed. ed.). St. Louis: Elsevier Health Sciences.
- Netter, F. H. (1989). *Atlas de Anatomía Humana*. Barcelona, España: Editorial MASSON.
- Norton, N. S. (2012). *Netter. Anatomía de Cabeza y Cuello para Odontólogos*: Elsevier Masson.
- O'Connor, C. F., Franciscus, R. G., & Holton, N. E. (2005). Bite force production capability and efficiency in Neandertals and modern humans. *American journal of physical anthropology*, 127(2), 129-151.
- Parada, C., & Chai, Y. (2015). *Mandible and tongue development* (Vol. 115): Elsevier.
- Paschetta, C., de Azevedo, S., Castillo, L., Martínez-Abadías, N., Hernández, M., Lieberman, D. E., et al. (2010). The influence of masticatory loading on craniofacial morphology: A test case across technological transitions in the Ohio valley. *American Journal of Physical Anthropology*, 141(2), 297-314.
- Perez, S. I., Bernal, V., & Gonzalez, P. N. (2007). Morphological differentiation of aboriginal human populations from Tierra del Fuego (Patagonia): Implications for South American peopling. *American Journal of Physical Anthropology*, 133(4), 1067-1079.

- Perez, S. I., & Monteiro, L. R. (2009). Nonrandom factors in modern human morphological diversification: a study of craniofacial variation in southern South American populations. *Evolution*, 63(4), 978-993.
- Planella, M. T., Falabella, F., Belmar, C., & Quiroz, L. (2014). Huertos, chacras y sementeras. Plantas cultivadas y su participación en los desarrollos culturales de Chile central. *Revista Española de Antropología Americana*, 44(2), 495.
- Proffit, W. R., Fields Jr., Henry W., Sarver David M. (2005). *Ortodoncia Contemporánea* (2013 ed.). España: Elsevier.
- Pucciarelli, H. M., Neves, W. A., González-José, R., Sardi, M. L., Rozzi, F. R., Struck, A., et al. (2006). East–West cranial differentiation in pre-Columbian human populations of South America. *HOMO - Journal of Comparative Human Biology*, 57(2), 133-150.
- Quirós-Álvarez, O. J. (2010). *Ortopedia Funcional de los maxilares y Ortodoncia Interceptiva* (2010 ed.). 1ra. Avenida Sur de Altamira, Edif. Rokaje, Planta 3, Urb. Altamira, Caracas - Venezuela: Editorial AMOLCA.
- Rayfield, E. J. (2007). Finite element analysis and understanding the biomechanics and evolution of living and fossil organisms. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 35, 541-576.
- Retamal, R., Pacheco, A., & Uribe, M. (2012). Dimorfismo sexual, distribución etaria y longevidad del cementerio Pica 8 (período Intermedio Tardío, 950-1450 DC, Norte Grande de Chile). *Estudios atacameños*(44), 89-106.
- Richmond, B. G., Wright, B. W., Grosse, I., Dechow, P. C., Ross, C. F., Spencer, M. A., et al. (2005). Finite element analysis in functional morphology. *The Anatomical Record*, 283(2), 259-274.
- Roberts, W. E., Viecilli, R. F., Chang, C., Katona, T. R., & Paydar, N. H. (2015). Biology of biomechanics: Finite element analysis of a statically determinate system to rotate the occlusal plane for correction of a skeletal Class III open-bite malocclusion. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 148(6), 943-955.
- Ross, C. F., Patel, B. A., Slice, D. E., Strait, D. S., Dechow, P. C., Richmond, B. G., et al. (2005). Modeling masticatory muscle force in finite element analysis: sensitivity analysis using principal coordinates analysis. *The Anatomical Record*, 283(2), 288-299.
- Rothhammer, F., Santoro, C. M., Poulin, E., Arriaza, B. T., Moraga, M., & Standen, V. J. (2009). Archeological and mtDNA evidence for Tropical Lowland

- migrations during the Late Archaic/Formative in northern Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82(4).
- Rouvière, H., Delmas A., & Delmas, V. (1987). *Anatomía Humana Descriptiva, Topográfica y Funcional* (2005 ed. Vol. 1). Barcelona - España: Editorial MASSON.
- Ruff, C., Holt, B., & Trinkaus, E. (2006). Who's afraid of the big bad Wolff?: "Wolff's law" and bone functional adaptation. *American Journal of Physical Anthropology*, 129(4), 484-498.
- Sadler, T. W. (2011). *Langman's Medical Embryology*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Santana-Sagredo, F., Schulting, R., Lee-Thorp, J., Agüero, C., Uribe, M., & Lemp, C. (2017). Paired radiocarbon dating on human samples and camelid fibers and textiles from northern Chile: the case of pica 8 (Tarapacá). *Radiocarbon*, 59(4), 1195-1213.
- Sardi, M. L., Novellino, P. S., & Pucciarelli, H. M. (2006). Craniofacial morphology in the Argentine center-west: Consequences of the transition to food production. *American Journal of Physical Anthropology*, 130(3), 333-343.
- Sardi, M. L., & Ramírez Rozzi, F. V. (2005). A cross-sectional study of human craniofacial growth. *Annals of Human Biology*, 32(3), 390-396.
- Shimizu, D., & Macho, G. A. (2007). Functional significance of the microstructural detail of the primate dentino-enamel junction: A possible example of exaptation. *Journal of Human Evolution*, 52(1), 103-111.
- Smith, B. H. (1984). Patterns of molar wear in hunter-gatherers and agriculturalists. *American Journal of Physical Anthropology*, 63(1), 39-56.
- Sperber, G. H., Guttman, G. D., & Sperber, S. M. (2001). *Craniofacial Development (Book for Windows & Macintosh)* (Vol. 1): PMPH-USA.
- Sperber, G. H., Guttman, Geoffrey D, Sperber, Steven M. (2001). *Craniofacial Development* (Vol. 1): PMPH-USA.
- Strait, D. S., Richmond, B. G., Spencer, M. A., Ross, C. F., Dechow, P. C., & Wood, B. A. (2007). Masticatory biomechanics and its relevance to early hominid phylogeny: an examination of palatal thickness using finite-element analysis. *Journal of Human Evolution*, 52(5), 585-599.
- Strait, D. S., Wang, Q., Dechow, P. C., Ross, C. F., Richmond, B. G., Spencer, M. A., et al. (2005). Modeling elastic properties in finite-element analysis: how much precision is needed to produce an accurate model? *The Anatomical*

Record, 283(2), 275-287.

- Stynder, D. D., Ackermann, R. R., & Sealy, J. C. (2007). Craniofacial variation and population continuity during the South African Holocene. *American Journal of Physical Anthropology*, 134(4), 489-500.
- Szwedowski, T. D., Fialkov, J., & Whyne, C. M. (2011). Sensitivity analysis of a validated subject-specific finite element model of the human craniofacial skeleton. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 225(1), 58-67.
- Testut, L. V., Antonio Riera; Sabater, José Corominas. (1964). *Tratado de Anatomía Humana* (Vol. 9). Barcelona - España: Salvat Barcelona.
- Toro-Ibacache, V. (2013). *A finite element study of the human cranium; The impact of morphological variation on biting performance*. (PhD in Medical Sciences), University of York, United Kingdom.
- Toro-Ibacache, V., Muñoz, V. Z., & O'Higgins, P. (2016). The relationship between skull morphology, masticatory muscle force and cranial skeletal deformation during biting. *Annals of Anatomy*, 203, 59-68.
- Toro-Ibacache, V., Fitton, L. C., Fagan, M. J., & O'higgins, P. (2016). Validity and sensitivity of a human cranial finite element model: implications for comparative studies of biting performance. *Journal of Anatomy*, 228(1), 70-84.
- Ugarte, F. (2017). *Morfología mandibular en poblaciones actuales y arqueológicas que ejercen distintas intensidades de cargas masticatorias de acuerdo a su dieta*. (Trabajo de investigación requisito para optar al título de cirujano dentista), Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Valenzuela-Yuraidini, C., Acuña, M. P., Harb, D., & Zuraiya, A. (1987). Gradiente Sociogenético en la Población Chilena. *Revista Médica de Chile*, 115(4), 295-299.
- Van Eijden, T. M. (2000). Biomechanics of the Mandible. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*, 11(1), 123-136.
- Velayos, J. L. D. S. H. (2007). *Anatomía de la Cabeza para odontólogos* (2010 ed.). Alberto Alcocer 24, Madrid - España: Editorial Médica Panamericana.
- Vogel, E. R., Van Woerden, J. T., Lucas, P. W., Atmoko, S. S. U., Van Schaik, C. P., & Dominy, N. J. (2008). Functional ecology and evolution of hominoid molar enamel thickness: Pan troglodytes schweinfurthii and Pongo pygmaeus wurmbii. *Journal of Human Evolution*, 55(1), 60-74.

- Von Cramon-Taubadel, N. (2011). Global human mandibular variation reflects differences in agricultural and hunter-gatherer subsistence strategies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(49), 19546-19551.
- Von Cramon-Taubadel, N. (2017). Measuring the effects of farming on human skull morphology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(34), 8917-8919.
- Wroe, S., Ferrara, T. L., McHenry, C. R., Curnoe, D., & Chamoli, U. (2010). The craniomandibular mechanics of being human. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*.

11. ANEXOS Y APÉNDICES

Anexo n°1:

Acta de aprobación del Comité de Ética de Investigación en Seres Humanos de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile, para el proyecto FONDECYT 11150175.



UNIVERSIDAD DE CHILE - FACULTAD DE MEDICINA
COMITÉ DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN EN SERES HUMANOS



04 ENE. 2016

ACTA DE APROBACIÓN DE PROYECTO

FECHA: 04 de enero de 2016.

PROYECTO: "THE ROLE OF MASTICATORY LOAD INTENSITY AND DENTAL OCCLUSAL RELATIONSHIPS IN SHAPING THE MODERN HUMAN SKULL" (EL ROL DE LA INTENSIDAD DE LA CARGA MASTICATORIA Y LAS RELACIONES OCLUSALES DENTALES EN LA FORMA CRANEOFACIAL HUMANA MODERNA) (Fondecyt Iniciación a la Investigación)

Investigadora Responsable: **Dra. Viviana Toro-Ibacache**, quien desempeña sus labores en la Facultad de Odontología de la Universidad de Chile.

Con fecha 22 de Diciembre de 2015, el proyecto ha sido analizado a la luz de los postulados de la Declaración de Helsinki, de la Guía Internacional de Ética para la Investigación Biomédica que involucra sujetos humanos CIOMS 1992, y de las Guías de Buena Práctica Clínica de ICH 1996.

Sobre la base de la información proporcionada en el texto del proyecto el Comité de Ética de Investigación en Seres Humanos de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile, estima que el estudio propuesto está bien justificado y que no significa para los sujetos involucrados riesgos físicos, psíquicos o sociales mayores o mínimos.

Cuenta con autorización de las siguientes autoridades para la adquisición de imágenes y uso de base de datos anonimizadas.

Director prof. Dr. Jean-Jacques HUBLIN, Director, Department of Human Evolution, Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie. (Institución Secundaria).

Prof. Dr. Lui Qevedo, ICOR, Instituto de Cirugía – Ortodoncia. Rehabilitación Oral y Maxilo Facial (base de datos de imágenes de tomografías computarizadas preoperatorias de pacientes ICOR)

Sebastián Krapivka F., Encargado de Colecciones Bioantropológicas, Departamento de Antropología, Facultad de Ciencias Sociales. Universidad de Chile (base de datos de resacas del Cementerio General de Santiago)

En virtud de las consideraciones anteriores el Comité otorga la aprobación ética para la realización del estudio propuesto, dentro de las especificaciones del protocolo.



UNIVERSIDAD DE CHILE - FACULTAD DE MEDICINA
COMITÉ DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN EN SERES HUMANOS

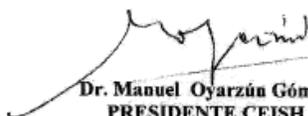


04 ENE. 2016

INTEGRANTES DEL COMITÉ DE ÉTICA DE LA INVESTIGACIÓN
EN SERES HUMANOS

NOMBRE	CARGO	RELACION CON LA INSTITUCION
Dr. Manuel Oyarzún	Presidente	Sí
Prof. Gina Raineri	Secretaria Ejecutiva	Sí
Dr. Hugo Amigo	Miembro	Sí
Dra. Lucía Cifuentes	Miembro	Sí
Dra. María Eugenia Pinto	Miembro	Sí
Dra. María Angela Delucchi	Miembro	Sí
Dra. Grisel Orellana	Miembro	Sí
Prof. Ma. Julieta González	Miembro	Sí
Sra. Claudia Marshall	Miembro	No
Dr. Miguel O' Ryan	Miembro Suplente	Sí

Santiago, 04 de enero de 2016.


 Dr. Manuel Oyarzún Gómez
 PRESIDENTE CEISH

MOG/lom.
Proyecto N° 203-2015
mtoroibacache@odontología.uchile.cl