

TESIS DOCTORAL



UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE ODONTOLOGÍA

CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE EVALUACIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL
RENDIMIENTO MASTICATORIO EMPLEANDO RECONOCIMIENTO
AUTOMÁTICO DE PATRONES DE DEGRADACIÓN EN ALIMENTOS DE
PRUEBA

GUSTAVO FABIÁN VACCARO WITT

DIRECTORES

PROF. Dr. JOSÉ IGNACIO PELÁEZ SÁNCHEZ

PROF. Dr. JOSÉ ANTONIO GIL MONTOYA

GRANADA 2018

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Gustavo Fabián Vaccaro Witt
ISBN: 978-84-9163-886-5
URI: <http://hdl.handle.net/10481/51699>

La presente Tesis Doctoral está avalada hasta la fecha de su lectura por los siguientes artículos científicos:

Vaccaro, Gustavo, Pelaez, José Ignacio, y Gil, José Antonio. (2016). Choosing the best image processing method for masticatory performance assessment when using two-coloured specimens. *Journal of Oral Rehabilitation*, 43(7), 496-504. doi:10.1111/joor.12392

Vaccaro, Gustavo, Peláez, José Ignacio, y Gil-Montoya, José Antonio. (2018). A novel expert system for objective masticatory efficiency assessment. *PLOS ONE*, 13(1), e0190386. doi:10.1371/journal.pone.0190386

AGRADECIMIENTOS

Quisiera mostrar mi agradecimiento a todos aquellos quienes han contribuido a que esta tesis doctoral sea posible.

A mis directores de tesis, José Ignacio Peláez y José Antonio Gil. Gracias José Ignacio por la confianza que me has brindado en los últimos seis años, por haber dedicado mucho esfuerzo en mi formación académica y personal, y más que nada por ser un gran amigo. Gracias a José Antonio Gil por haberme apoyado con tanta dedicación y esmero, por cuidar de los detalles, por tus consejos, y por estar siempre que lo he necesitado.

A mis compañeros de laboratorio, por compartir día a día la aventura de la investigación científica. A Francisco por acompañarme en incontables jornadas maratónicas para alcanzar los objetivos planteados, a Jaime por ayudarme a construir una de las primeras versiones del sistema y a Yesnier por su apoyo y consejo.

A los directivos de la Facultad de Odontología de la Universidad de Guayaquil, por apoyar el desarrollo de la fase experimental de esta investigación.

A mi madre, por darme todo su apoyo incondicional, por creer en mí y haber hecho que toda esta tesis sea posible. A mi padre, por entregarme ese amor por la ciencia.

A Ana, por acompañarme durante todo el desarrollo de esta tesis, por enseñarme a estructurar mis ideas, por tu cariño, paciencia, dedicación y ejemplo.



La investigación presentada en esta Tesis Doctoral ha sido financiada parcialmente por la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) de la República del Ecuador, por el Instituto de Fomento al Talento Humano de la República de Ecuador y del Proyecto Prometeo impulsado por el Gobierno del Ecuador durante los años 2014 al 2016.

CONTENIDOS

SUMMARY	17
RESUMEN.....	21
I. Introducción.....	25
1. La masticación.....	27
1.1. Estímulos sensoriales asociados a la masticación	28
1.2. La deglución.....	29
1.3. Masticación y cognición	30
1.4. Alteraciones en la función masticatoria relacionadas con la edad	33
2. Indicadores de la función masticatoria	34
2.1. El Rendimiento Masticatorio	35
2.1.1. Cuantificación del tamaño medio de las partículas.	36
2.1.2. Análisis de mezcla.....	42
2.2. La Eficiencia Masticatoria	45
II. Justificación, Hipótesis y Objetivos.....	47
1. Justificación	49
1.1. El problema del análisis del Rendimiento la Eficiencia Masticatoria... ..	49
1.2. Nuevas definiciones para el Rendimiento y la Eficiencia Masticatoria ..	51
2. Hipótesis.....	52
3. Objetivos.....	53
III. Materiales y métodos	55
1. Participantes	57
1.1. Grupo de Referencia para calibración (G_r):	57
1.2. Grupo de Referencia para validación (G_v):	57
1.3. Grupo de diagnóstico (G_d):.....	57
2. Alimento de prueba.....	58

3.	Recolección y análisis de muestras.....	58
3.1.	Protocolo de recolección de muestras.....	58
3.2.	Digitalización.....	59
3.3.	Segmentación de las imágenes digitales.....	60
3.4.	Extracción de características de las imágenes.....	62
3.5.	Selección de indicadores de mezcla relevantes.....	65
3.6.	Reducción dimensional.....	66
3.7.	Aprendizaje de máquina.....	66
3.8.	Codificación de clasificadores entrenados.....	69
3.9.	Cuantificación del rendimiento y eficiencia masticatoria.....	69
4.	Análisis estadístico.....	70
IV.	Resultados.....	73
1.	Procesamiento de imágenes digitales.....	75
1.1.	Tiempo de ejecución.....	75
1.2.	Indicadores de mezcla relevantes.....	75
1.3.	Modelos de clasificación.....	80
2.	Diagnóstico del rendimiento y eficiencia masticatorias.....	84
V.	Discusiones y conclusión.....	85
1.	Discusiones.....	87
2.	Implicaciones clínicas.....	91
3.	Recomendaciones para investigaciones futuras.....	92
4.	Conclusiones.....	92
VI.	Bibliografía.....	95
VII.	Anexos.....	111
1.	Anexo 1: Esquema XML del modelo entrenado.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Etiquetas asociadas a los niveles de Eficiencia Masticatoria	52
Tabla 2 Denominación de los extractores de características de imágenes digitales empleados en el estudio	65
Tabla 3 Detalle del tiempo de ejecución del procedimiento de calibración y entrenamiento del sistema de clasificación.....	75
Tabla 4 Resultados del análisis de relevancia para los métodos de análisis de imágenes demostraron capacidad de discriminar entre diferentes números de ciclos masticatorios.....	76
Tabla 5 Resultados del análisis de componentes principales aplicado sobre las mediciones obtenidas de los métodos de análisis de imágenes considerados como relevantes para la cuantificación de la mezcla.	79
Tabla 6 Métricas de rendimiento del mejor clasificador obtenido.....	80
Tabla 7 Resultados individuales de métricas de rendimiento para clasificadores unitarios por tipo de método de análisis de imágenes.....	81
Tabla 8 Estadísticos descriptivos de los resultados de la medición de ME y MP empleando el sistema calibrado	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ilustración de la distribución de partículas de alimento de prueba que atraviesan una serie de tamices anidados según el método de Manly y Braley (1950).	37
Figura 2 Ejemplo de la aplicación del método de Olthoff et al. (1984) para relacionar el número de ciclos masticatorios con el tamaño medio de las partículas, aplicado dos sujetos: A y B; donde el sujeto A tiene compromiso masticatorio por pérdida de dientes, y el sujeto B es completamente dentado y sin compromiso masticatorio. 39	
Figura 3 Fases del proceso de conminución del alimento.....	40
Figura 4 Ejemplo de goma de mascar bicolor sometida a la masticación.	43
Figura 5 Ejemplo de imágenes de muestras de alimento de prueba sometido a diferentes números de ciclos masticatorios.....	59
Figura 6 Ejemplo del resultado del proceso de segmentación.....	62
Figura 7 Ejemplo de una muestra de goma de mascar examinada desde diferentes espacios de color.	64
Figura 8 Representación gráfica de la relación entre el número de ciclos masticatorios reales versus el número de ciclos masticatorios inferidos en el cálculo de la Eficiencia Masticatoria.....	70
Figura 9 Representación gráfica de la capacidad de diferenciar entre pares de ciclos masticatorios y la correlación monotónica con el número de ciclos masticatorios de las mediciones obtenidas por cada uno de los métodos de análisis de imágenes empleados en el estudio.	78

SUMMARY

Mastication is one of the essential activities in the life of every human being. It is the starting point of the act of feeding, where the food is crushed and mixed with saliva to form a bolus that can be easily digested. The mastication activity involves several components of the nervous, musculoskeletal, and stomatognathic systems; therefore, a variety of disorders can disrupt the quality of mastication, either by altering the components forming part of the masticatory apparatus, by diminishing the bite force, or affecting the nervous system. Common causes for masticatory compromise are tooth loss (Sato et al., 2016), invasive dental treatments (Kimoto, Yamamoto, Shinomiya, y Kawai, 2010), motor disorders caused by an ictus (M Schimmel et al., 2011), orthodontic treatments (Magalhães, Pereira, Andrade, Gouvea, y Gameiro, 2014), jaw fractures (Sybil y Gopalkrishnan, 2013), and degenerative diseases (Bakke, Larsen, Lautrup, y Karlsborg, 2011).

A decrease in the masticatory capabilities directly affects the quality of life of the individual, especially in vulnerable elderly and disabled populations (Sato et al., 2016). The need to accurately evaluate the severity of masticatory disability prompted the development of various procedures, namely Masticatory Efficiency and Performance Assessment Techniques (MEPAT), which are diagnostic strategies intended to measure the capacity of an individual to attain a standard degree of food comminution under controlled experimental conditions. MEPATs are based on the quantification of the degradation of a food piece when subjected to a certain number of chewing strokes; where the level of degradation is quantified by measuring a characteristic (i.e., weight, average particle size, chemical concentrations, colour, etc.). Currently, most MEPATs are conditioned to the field of scientific research since they require specialized training, laboratory equipment, and considerably long running times; therefore, the evaluation of the masticatory function within a clinical context is severely limited. Furthermore, the most commonly used MEPATs retain various weaknesses: poorly documented procedures, lack of consensus about which properties of the test-food should be measured, lack of a standard measurement scale, inability to compare results obtained from different techniques, and a narrow set of test-foods (Halazonetis, Schimmel, Antonarakis, y Christou, 2013; Prinz, 1999; M Schimmel, Christou, Herrmann, y Müller, 2007; Martin Schimmel et al., 2015; Gustavo Vaccaro, Pelaez, y Gil, 2016).

This study presents a novel system for Masticatory Efficiency and Performance assessment based on automatic recognition of mixture patterns of masticated two-coloured chewing gums using a combination of computational intelligence and image processing techniques. The hypotheses tested were: (1) general purpose image analysis procedures were able to discriminate between different amounts of chewing strokes, (2) the proposed system could accurately relate specimens to the number of chewing cycles, (3) the proposed system could differentiate the masticatory efficiency between dentate and edentulous individuals, and (4) that the proposed system could identify differences in the mixture patterns of edentulous individuals after receiving complete denture treatment.

This study enrolled 250 fully-dentate adults (130 females and 120 males, 25 ± 9 years of age) as the reference population, 80 fully-dentate adults (41 females and 39 males, 25 ± 5 years of age) as the validation population, and 40 edentulous adults (21 females and 19 males, 72 ± 8.9 years of age) for the testing group. The test-food selected for this study was a two-coloured chewing gum wafer composed of two layers of Trident® chewing gum (red and white). Subjects in the reference group masticated 8 test-food samples for 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, and 25 chewing cycles, accounting for 2000 samples. Subjects in the validation group masticated 5 test-food samples for 0, 5, 10, 15, and 20 chewing cycles, accounting for 400 samples. Subjects in the testing group masticated 4 samples in two sessions: prior and after treatment with complete removable dentures, during 20 chewing cycles, accounting for 160 samples. A total of 2560 samples were collected, which in turn accounted for 5120 digital images, one per side of the sample.

Each of the images in the dataset was analysed using 121 different, general-purpose, digital image analysis methods to extract feature characteristics of the sample, in an effort to quantify the mixture. Then, the Masticatory Efficiency was computed as the inferred number of chewing strokes that a healthy reference individual would need to achieve a similar degree of mixture measured against the real number of cycles applied to the specimen. The normality of the distribution of measures per digital image analysis method was evaluated using the Kolmogorov-Smirnov test, and the ability to differentiate between pairs of numbers of chewing cycles was evaluated with ANOVA corrected with *post hoc* Bonferroni; then, the

correlation of the measurements with the number of chewing strokes was evaluated using Spearman's rank correlation coefficient. Afterwards, a relevance for each of the image processing methods was computed using a multiple-criteria decision analysis approach, and the Promax-rotated factors from a Principal Component Analysis. Then, the trained pattern identification model was evaluated using the Mathews Correlation Coefficient score. Finally, the differences in Masticatory Efficiency measures obtained from the recognition of mixture patterns for the edentulous population in the testing group, observed prior and after treatment, was evaluated using the Wilcoxon signed rank test; and the inter-observer consensus was evaluated with the Cohen's Kappa statistic.

Results showed that measures provided by all of the image processing methods intended for feature extraction were normally distributed ($p < 0.05$), 116 proved able to differentiate between at least 2 pairs of different chewing strokes ($p < 0.05$), and 35 showed moderate-to-high correlation with the number of cycles ($|\rho| > 0.5$; $p < 0.05$). The Variance of the Histogram of the Hue showed the highest correlation with the number of cycles ($\rho = 0.791$; $p < 0.0001$), and the highest relevance score. The trained classifier obtained a Mathews Correlation Coefficient score of 0.97. The Masticatory Efficiency measurements on the testing group showed almost perfect agreement considering pre- and post-treatment appointments separately ($\kappa \geq 0.95$). Wilcoxon signed-rank test showed that a complete denture treatment for edentulous patients elicited a statistically significant increase in the Masticatory Efficiency measurements ($Z = -2.31$, $p < 0.01$).

We conclude that general-purpose image processing methods can be used reliably to extract features of mixture in two-coloured chewing gum samples. Also, that a Masticatory Efficiency and Performance assessment system based on computational intelligence methods for pattern recognition that made use of the beforementioned digital image analysis methods can accurately relate specimens to the number of chewing cycles, differentiate the masticatory efficiency between dentate and edentulous individuals, and identify differences in the mixture patterns of edentulous individuals after receiving complete denture treatment.

RESUMEN

La masticación es una de las actividades esenciales en la vida de cada ser humano. Es el punto de partida del acto de la alimentación, donde la comida se tritura y se mezcla con la saliva para formar un bolo que se puede digerir fácilmente. La actividad de masticación involucra varios componentes de los sistemas nervioso, musculoesquelético y estomatognático; por lo tanto, una variedad de trastornos puede alterar la calidad de la masticación, ya sea alterando los componentes que forman parte del aparato masticatorio, disminuyendo la fuerza de la mordida o afectando el sistema nervioso. Las causas comunes de compromiso masticatorio son la pérdida de dientes (Sato et al., 2016), tratamientos dentales invasivos (Kimoto et al., 2010), trastornos motores causados por un ictus (M Schimmel et al., 2011), tratamientos de ortodoncia (Magalhães et al., 2014), fracturas de mandíbula (Sybil y Gopalkrishnan, 2013) y enfermedades degenerativas (Bakke et al., 2011).

Una disminución en las capacidad masticatoria afecta directamente la calidad de vida del individuo, especialmente en poblaciones vulnerables como adultos mayores y discapacitados (Sato et al., 2016). La necesidad de evaluar con precisión la gravedad de la discapacidad masticatoria motivó el desarrollo de diversos procedimientos, denominadas Técnicas de Evaluación de Rendimiento y Eficiencia Masticatoria (MEPAT), que son estrategias de diagnóstico destinadas a medir la capacidad de un individuo para alcanzar un grado estándar de degradación de alimentos en condiciones experimentales controladas. Las MEPAT se basan en la cuantificación de la degradación de una pieza de alimento cuando se someten a un cierto número ciclos masticatorios; donde el nivel de degradación se cuantifica midiendo una característica (ej. peso, tamaño de partículas, concentraciones químicas, color, etc.). Actualmente, la mayoría de las MEPAT están condicionados al campo de la investigación científica ya que requieren capacitación especializada, equipos de laboratorio y tiempos de ejecución considerablemente largos; por lo tanto, la evaluación de la función masticatoria dentro de un contexto clínico es severamente limitada. Además, los MEPAT más comúnmente utilizados poseen varias debilidades, tales como procedimientos mal documentados, falta de consenso sobre qué propiedades de los alimentos de prueba se deben medir, falta de una escala de medición estándar, incapacidad para comparar los resultados obtenidos de diferentes técnicas y un muy pocos alimentos de prueba validados para su utilización

(Halazonetis et al., 2013; Prinz, 1999; M Schimmel et al., 2007; Martin Schimmel et al., 2015; Gustavo Vaccaro et al., 2016).

Este estudio presenta un nuevo sistema de evaluación de Eficiencia y Rendimiento Masticatorio basado en el reconocimiento automático de patrones de mezcla de gomas de mascar bicolores sometidos a la masticación, empleando una combinación de inteligencia computacional y técnicas de procesamiento de imágenes. Se persiguieron los siguientes objetivos: (i) Analizar la correlación existente entre el número de ciclos masticatorios y las mediciones de MP obtenidas a partir de procedimientos de análisis de imágenes basados en la extracción de características de los píxeles y el análisis de histogramas. (ii) Establecer un proceso de selección de procedimientos de análisis de imágenes óptimos para la medición del MP para los alimentos de prueba disponibles para el estudio. (iii) Modelar un sistema experto para reconocimiento de patrones de mezcla en gomas de mascar bicolores. (iv) Validar el sistema experto propuesto en la muestra de estudio y evaluar las posibles limitaciones del modelo como método de diagnóstico del ME. Las hipótesis probadas fueron: (1) los procedimientos de análisis de imágenes de propósito general son capaces de discriminar la mezcla producida entre diferentes cantidades de ciclos masticatorios, (2) el sistema propuesto puede relacionar con precisión a los especímenes con el número de ciclos de masticación, (3) el sistema propuesto puede diferenciar la eficiencia masticatoria entre individuos dentados y edéntulos, y (4) el sistema propuesto puede identificar diferencias en los patrones de mezcla de individuos edéntulos después de recibir el tratamiento con prótesis totales removibles.

Este estudio reclutó a 250 adultos completamente dentados (130 mujeres y 120 hombres, 25 ± 9 años) como la población de referencia, 80 adultos completamente dentados (41 mujeres y 39 hombres, 25 ± 5 años) como la población de validación, y 40 adultos edéntulos (21 mujeres y 19 hombres, $72 \pm 8,9$ años) para el grupo de prueba. El alimento de prueba seleccionado fue un chicle de dos colores compuesto por dos capas de chicle Trident® (rojo y blanco). Los sujetos en el grupo de referencia masticaron 8 chicles durante 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 y 25 ciclos de masticación, obteniéndose 2000 muestras. Los sujetos en el grupo de validación masticaron 5 chicles durante 0, 5, 10, 15 y 20 ciclos de masticación, obteniéndose 400

muestras. Los sujetos en el grupo de prueba masticaron 4 chicles en dos sesiones, antes y después del tratamiento con prótesis totales removibles completas, durante 20 ciclos de masticación, obteniéndose 160 muestras. Se recolectó un total de 2560 muestras, que a su vez representaron 5120 imágenes digitales, una por lado de la muestra.

Cada una de las imágenes en el dataset se analizó utilizando 121 métodos de análisis de imágenes digitales de propósito general para extraer sus características en un esfuerzo por cuantificar la mezcla. Luego, la Eficiencia Masticatoria se calculó como el número inferido de ciclos masticatorios que un individuo de referencia saludable necesitaría para lograr un grado similar de mezcla medido contra el número real de ciclos aplicados a la muestra. La normalidad de la distribución de medidas obtenida por cada método de análisis de imágenes se evaluó mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov, y la capacidad de diferenciar entre pares de números de ciclos de masticación se evaluó con ANOVA corregido con pos hoc Bonferroni; luego, la correlación de las medidas con el número de ciclos masticatorios se evaluó usando el coeficiente de correlación de rangos de Spearman. Posteriormente, se calculó la relevancia de cada uno de los métodos de procesamiento de imágenes utilizando un enfoque de análisis de decisión de criterios múltiples y los factores rotados por Promax en un análisis de componentes principales. Luego, el modelo de identificación de patrones entrenado se evaluó utilizando el Coeficiente de Correlación de Mathews. Finalmente, las diferencias en las medidas de Eficiencia Masticatoria obtenidas del reconocimiento de los patrones de mezcla para la población desdentada en el grupo de prueba, observadas antes y después del tratamiento, se evaluaron usando la prueba de rango con signo de Wilcoxon; y el consenso entre observadores se evaluó con el estadístico Kappa de Cohen.

Los resultados mostraron que las medidas proporcionadas por todos los métodos de procesamiento de imágenes para la extracción de características se distribuyeron normalmente ($p < 0,05$), 116 demostraron ser capaces de diferenciar al menos 2 pares de ciclos masticatorios ($p < 0,05$) y 35 mostraron correlación moderada a alta con el número de ciclos masticatorios ($|\rho| > 0,5$; $p < 0,05$). La varianza del histograma del tono mostró la mayor correlación con el número de

ciclos ($\rho = 0,791$, $p < 0,0001$) y la puntuación más alta de relevancia. El clasificador entrenado obtuvo Coeficiente de Correlación de Mathews de 0,97. Las mediciones de Eficiencia Masticatoria en el grupo de prueba mostraron un acuerdo casi perfecto considerando las citas previas y posteriores al tratamiento por separado ($\kappa \geq 0,95$). La prueba de Wilcoxon mostró que un tratamiento con prótesis totales removibles provocó un aumento estadísticamente significativo en las mediciones de Eficiencia Masticatoria ($Z = -2,31$, $p < 0,01$).

Se concluye que, los métodos de procesamiento de imágenes de propósito general se pueden usar de manera confiable para extraer características de la mezcla en muestras de chicle bicolores. Además, que un sistema de evaluación de la Eficiencia y Rendimiento Masticatorio basado en métodos de inteligencia computacional para el reconocimiento de patrones que hace uso de los métodos de análisis de imágenes digitales antes mencionados puede relacionar con precisión a especímenes de alimento de prueba con el número de ciclos de masticatorios aplicados sobre estos. Finalmente, se concluye que el sistema propuesto es capaz de diferenciar la Eficiencia Masticatoria entre individuos dentados y edéntulos, y de identificar las diferencias en los patrones de mezcla de individuos edéntulos después de recibir el tratamiento con prótesis totales removibles.

I. INTRODUCCIÓN

1. LA MASTICACIÓN

La masticación es una de las actividades esenciales de la vida del ser humano ya que es el inicio del proceso digestivo. Desde un punto de vista mecánico, la masticación es un acto rítmico intermitente, que involucra una coordinación entre la lengua, los músculos de la cara y los músculos masticatorios. En este proceso, el alimento se coloca entre los dientes, luego es triturado y mezclado con la saliva, para finalmente ser preparado para la deglución (Lund, 1991). La masticación humana ha sido altamente influenciada por la evolución de los mamíferos para aprovechar al máximo los diversos tipos de comida disponibles; en este contexto, se destaca el tamaño y complejidad de los músculos de la masticación, los cuales ocupan una gran parte de la cabeza (Schumacher, 1980).

Por otra parte, desde un punto de vista fisiológico, la activación y coordinación de los músculos masticadores determinan la dirección de los movimientos mandibulares y el control de las fuerzas de oclusión (Herring, 2007). La mayoría de las fibras musculares de los músculos masticatorios se insertan en aponeurosis en lugar del hueso directamente; por lo que, aquellas fibras insertadas en superficies diferentes de la aponeurosis también tienen orientaciones diferentes. Consecuentemente, las pequeñas variaciones en la activación de estas fibras musculares durante la masticación pueden provocar cambios significativos en la dirección de contracción del músculo (Turkawski, Van Eijden, y Weijs, 1998).

Desde hace varias décadas se conoce que los movimientos que ocurren durante la masticación, aunque coherentes y rítmicos, poseen un alto nivel de aleatoriedad (Manly y Braley, 1950). Esto provoca que sea complejo realizar modelos precisos de los movimientos mandibulares, de la lengua y de los músculos de la cara (Daumas, Xu, y Bronlund, 2005). En promedio, la frecuencia de masticación es de 1,45Hz para hombres, y 1.77 Hz para mujeres; esto es, 14,5 y 17,7 ciclos masticatorios por cada diez segundos respectivamente (Peyron, Blanc, Lund, y Woda, 2004). Esta frecuencia de masticación es relativamente constante, pero es influenciada por varios factores, tales como la consistencia del alimento, la secuencia masticatoria, y la motivación del sujeto (Morimoto, Inoue, Nakamura, y Kawamura, 1984).

La duración del ciclo masticatorio, la velocidad de la apertura y el cierre de la mandíbula, el grado de apertura, y la fuerza máxima de oclusión son los componentes principales que caracterizan el patrón masticatorio (Hama et al., 2017; Morimoto et al., 1984). En general, una alteración en el patrón masticatorio está acompañado de cambios en alguno de estos componentes.

1.1. Estímulos sensoriales asociados a la masticación

Tanto la masticación como la deglución están controladas por un generador central de patrones específico localizado en el tronco cerebral, el cual coordina los movimientos de forma aparentemente reactiva a las características físicas del alimento, más que a la voluntad del sujeto (Yamashita, Hatch, y Rugh, 1999). Por lo tanto, la masticación requiere una gran cantidad de información sensorial de la cavidad bucal para la regulación y adaptación de los cambios del bolo alimenticio dentro de la boca; y una deglución segura depende directamente de estos estímulos sensoriales (Steele y Miller, 2010).

La entrada del alimento en la boca produce una gran cantidad de estímulos sensoriales, los cuales evolucionan durante la masticación mientras el alimento es transformado poco a poco en un bolo que pueda ser deglutido. A partir de esta información sensorial acerca del estado del bolo en todo momento de la secuencia de masticación, el centro de generación de patrones en el cerebro puede decidir si continuar con la masticación para avanzar con la degradación del alimento, o detener la masticación. En este último caso, el centro de generación de patrones del cerebro pasa a controlar las fuerzas linguales y movimientos orales para de esta manera propulsar el bolo a la faringe; disparando así la deglución (Peyron et al., 2011; Steele y Miller, 2010).

Entre los estímulos táctiles que proveen la mayor cantidad de información acerca del estado del bolo alimenticio dentro de la boca, se considera al nivel de reducción del alimento como fundamental en la producción de aquellos estímulos que marcan tanto el final de la masticación como el inicio de la deglución (Peyron et al., 2011; Speksnijder, Abbink, van der Glas, Janssen, y van der Bilt, 2009). Una de las maneras en las que se ha evaluado el estado del bolo alimenticio antes de ser

deglutido es a partir de la distribución del tamaño de las partículas (Olthoff, van der Bilt, Bosman, y Kleizen, 1984; Andries van der Bilt, 2011).

La distribución del tamaño de las partículas justo antes de la deglución se ha sido denominada como el “umbral de deglución” (Olthoff et al., 1984). Por otra parte, este indicador no logra explicar completamente los estímulos asociados a la finalización de la masticación (Slagter, Bosman, y van der Bilt, 1993; Andries van der Bilt, 2011). En la actualidad, se considera que la finalización de la masticación coincide con un punto en el cual el alimento ha alcanzado un nivel de cohesión “suficiente” para que este pueda ser deglutido con normalidad (Ishihara, Nakauma, Funami, Otake, y Nishinari, 2011). Sin embargo, los estímulos que provocan la finalización de la masticación y que indican que el bolo alimenticio se encuentra listo para ser deglutido presentan una variabilidad muy alta; demostrado por el amplio margen de niveles de cohesión que puede tener un bolo para que pueda ser aceptado; especialmente durante la deglución voluntaria (Prinz, 1999; Prinz y Lucas, 2001).

1.2. La deglución

La deglución es un proceso reflejo complejo que permite al bolo alimenticio pasar de la boca a la faringe y al esófago, cerrando la epiglotis. La deglución ocurre al finalizar la masticación, y puede ser iniciada voluntariamente. De manera general, la deglución comprende tres fases bien diferenciadas: la fase oral, la fase faríngea, y la fase esofágica.

La fase oral de la deglución puede ser controlada voluntariamente en su totalidad, y está controlada por la corteza frontal del cerebro y el sistema límbico. Estudios previos sugieren que las propiedades del alimento sometido a la masticación inducen la necesidad de iniciar la deglución en esta fase (Peyron et al., 2011). Además, desde hace varios años se conoce que algunos aspectos de la secuencia de contracción muscular asociada a la deglución pueden ser modificados, incluyendo la duración de la activación de músculos individuales y la amplitud de la contracción muscular (Hryciyshyn y Basmajian, 1972).

Luego, la fase faríngea de la deglución es una respuesta refleja, controlada por el centro de la deglución en el bulbo raquídeo y el puente tronco-encefálico. Estos reflejos son activados por la presencia del bolo alimenticio en la parte posterior de la boca; donde pasa desde la base de la lengua hasta la pared faríngea posterior. Esta secuencia de movimientos fuerza que la epiglotis cubra la laringe, impidiendo así que el bolo pase al tracto respiratorio. Rápidamente, se relaja el esfínter esofágico superior, lo que permite que la entrada del bolo alimenticio en el esófago.

Finalmente, la fase esofágica de la deglución ocurre de manera involuntaria, cuando el bolo alimenticio entra al esófago y es impulsado hacia el estómago gracias a movimientos musculares rítmicos. Esta comienza con la relajación del esfínter esofágico superior siguiendo la onda de contracción faríngea seguida por una onda de contracción primaria del músculo circular.

La mayoría de los expertos considera que la deglución involucra la modulación de estímulos sensoriales y de las vías corticales descendentes (Daniels et al., 2002; Hamdy et al., 1999; Hamdy, Aziz, Thompson, y Rothwell, 2001). Estudios primarios en modelos animales indican que la secuencia de la deglución presenta una línea base o modo por defecto; esto es, un reflejo básico derivado del tronco cerebral que puede ser modificado por el sujeto consciente (Doty, Richmond, y Storey, 1967).

1.3. Masticación y cognición

Se conoce que la cognición está relacionada con la máxima fuerza de mordida y el rango máximo de movimientos mandibulares, especialmente en adultos mayores portadores de prótesis totales (Scherder, Posthuma, Bakker, Vuijk, y Lobbezoo, 2008). Además, se ha relacionado el edentulismo con el empeoramiento del rendimiento cognitivo en adultos mayores (Bergdahl, Habib, Bergdahl, Nyberg, y Nilsson, 2007). Es importante notar que algunos estudios han reconocido la pérdida prematura de dientes como un riesgo de la enfermedad de Alzheimer en adultos, y que tener pocos dientes aumenta el riesgo de desarrollar demencia en la

población no portadora de la apolipoproteína E4 (Stein, Desrosiers, Donegan, Yepes, y Kryscio, 2007).

El estudio en ratones presentado por Su et al. sugiere que la pérdida de dientes se encuentra correlacionada con el desarrollo de la demencia senil y el Alzheimer (Su et al., 2014). En este contexto, Weijenberg et al. presentaron una revisión de la literatura con el objetivo de investigar las relaciones existentes entre la masticación y la cognición, enfocándose especialmente en la demencia senil y sus posibles mecanismos subyacentes. Los resultados de estas investigaciones demuestran que existe una relación causal entre el deterioro de la función masticatoria y la cognición en animales; y que, por otra parte, existe una correlación entre el deterioro cognitivo y el estado de salud oral en humanos adultos mayores (Weijenberg, Scherder, y Lobbezoo, 2011).

Los mecanismos subyacentes al deterioro cognitivo en relación con la función masticatoria se pueden explicar como una alteración de los patrones de activación en las áreas del cerebro normalmente activadas durante la masticación, siendo el córtex prefrontal la más relevante de estas (Salat et al., 2004). Esto es importante ya que el córtex prefrontal, así como el cerebelo, es sensible al envejecimiento (Keller et al., 2015). Por otra parte, los efectos de la edad sobre otras estructuras como el hipocampo, y la disminución del nivel de actividad general en el cerebro resulta en una función cognitiva menos flexible (Cooper, Greve, y Henson, 2017).

Otros estudios realizados con ratones, tales como los presentados por Onozuka et al. y Yamamoto et al. muestran de manera específica que los impedimentos en la masticación conducen a aberraciones conductuales de larga duración tales como deterioros en el aprendizaje y en la memoria espacial (Onozuka et al., 1999; Yamamoto y Hirayama, 2001). En base a esto, Tsutsui et al. propone un modelo que explica los efectos de una dieta blanda prolongada en el aprendizaje (Tsutsui et al., 2007). En general, se considera que el deterioro en la masticación en ratones produce cambios fisiológicos significativos a largo plazo, los cuales son especialmente graves en los casos de la pérdida de las coronas de los molares (Watanabe et al., 2002).

Una de las posibles explicaciones a la relación entre la masticación y la cognición es que una reducción en los estímulos sensoriales influye negativamente en la neurogénesis (Yamamoto y Hirayama, 2001). Esto se deduce de las conclusiones del estudio presentado por Yamamoto et al., donde se muestra que una reducción del rendimiento masticatorio inducido por una dieta blanda reduce la densidad sináptica en la corteza cerebral, particularmente en las regiones parietales (Yamamoto y Hirayama, 2001). Posteriormente, de Tsutsui et al. demostraron que una dieta blanda continuada en el tiempo reduce los estímulos aferentes asociados a la masticación e induce la pérdida neuronal en el hipocampo y reduce la capacidad de aprendizaje y memorización (Tsutsui et al., 2007). Por lo tanto, existe una posibilidad de que el empobrecimiento de los estímulos sensoriales asociados a una dieta blanda prolongada conduzcan a efectos negativos en la cognición.

Otro posible mecanismo por el cual la masticación afecta la cognición está relacionado con el estrés. Se conoce que el acto de masticar reduce el estrés tanto en seres humanos como animales (Scholey et al., 2009); por lo tanto, una masticación impedida puede causar estrés, o dificultar los medios por los cuales se puede contrarrestar. Este fenómeno ha sido estudiado por Onozuka et al. y Kubo et al. los cuales demostraron que ratones SAMP8 de edad avanzada mostraban valores significativamente más elevados de corticosterona cuando sus molares eran removidos o se les impedía la masticación al colocar resina sobre los molares (Kubo et al., 2007; Onozuka, Watanabe, Fujita, Tonosaki, y Saito, 2002). Esto sugiere que el deterioro de la función masticatoria puede afectar el eje hipotalámico-hipofisario-adrenal asociado con el estrés crónico, lo cual puede afectar la memoria y la capacidad de aprendizaje (Weijenberg et al., 2011).

Por otra parte, es interesante destacar que la masticación puede mejorar el desempeño cognitivo en seres humanos. En un estudio presentado por Hirano et al. se demostró que un grupo de jóvenes entre 18 y 46 años desempeñaban mejor una serie de tareas y mejoraban su concentración mientras masticaban una goma de mascar (Hirano et al., 2008). En otro estudio presentado por Stephens et al. se demostró que masticar goma de mascar mejora la memoria de trabajo, la memoria episódica a largo plazo, la atención y la velocidad de procesamiento de la

información (Stephens y Tunney, 2004). Además, en el trabajo presentado por Wilkinson et al. se ha demostrado que la masticación mejora la capacidad de recordar palabras y la memoria de trabajo numérico (Wilkinson, Scholey, y Wesnes, 2002). Sin embargo, la masticación también se ha asociado a un incremento en el tiempo de reacción y en el número de errores producidos por mantener la atención durante periodos prolongados de tiempo (Tucha, Mecklinger, Maier, Hammerl, y Lange, 2004).

En conclusión, varios estudios sugieren que una disminución en la actividad masticatoria coincide con un deterioro crónico de la función cognitiva; con una capacidad de aprendizaje disminuida y un deterioro en la memoria espacial. Además, se ha identificado una disminución de los niveles de proliferación de neuronas y de su densidad en la corteza cerebral. Por otra parte, se ha encontrado alteraciones bioquímicas relacionadas con el estrés inducidas por una pérdida de la capacidad masticatoria. Sin embargo, no existe evidencia suficiente para sostener un principio de causalidad: pérdida de capacidad masticatoria → deterioro cognitivo; ya que varias de estas alteraciones también están relacionadas con la edad, con el consumo de glucosa, con los hábitos alimenticios, y con las preferencias individuales sobre los alimentos que se consumen. Finalmente, existen claros indicios de que la masticación tiene efectos positivos en el desempeño cognitivo en jóvenes adultos; pero los mecanismos por los que esto ocurre no han sido explorados en profundidad, por lo que tampoco se pueden establecer relaciones causales entre masticación → aumento de la capacidad cognitiva.

1.4. Alteraciones en la función masticatoria relacionadas con la edad

El envejecimiento natural en los seres humanos está asociado con un deterioro en la función masticatoria, principalmente asociado con la pérdida de dientes naturales (Endo et al., 2014; Newton, Yemm, Abel, y Menhinick, 1993; Andries van der Bilt, 2011). Además, algunos estudios registran una correlación entre la edad avanzada con el aumento en la acumulación de residuos alimenticios en la boca y la garganta como sub-producto de la masticación (Weijenberg et al., 2011; Yoshikawa et al., 2005).

En cuanto a la frecuencia masticatoria, el estudio presentado por Peyron et al. sugiere que los seres humanos aumentan el número de ciclos masticatorios promedio en 0,3 ciclos por año, sin diferencias entre hombres y mujeres (Peyron et al., 2004). Este fenómeno puede ser explicado, en parte, por una disminución progresiva de la capacidad de apertura bucal, y un aumento sostenido del tiempo necesario para realizar este movimiento de apertura (Peyron et al., 2004).

Se considera que la función masticatoria normal requiere de una buena salud oral general, preferiblemente con nueve o más pares antagonistas, independientemente de la edad (Gotfredsen y Walls, 2007). Asimismo, una buena función masticatoria junto con una buena salud oral es necesaria para una nutrición adecuada y variada; aspecto que se vuelve más importante en adultos mayores.

2. INDICADORES DE LA FUNCIÓN MASTICATORIA

Uno de los objetivos de la terapia odontológica es mejorar la función masticatoria de los pacientes. En palabras de Manly y Braley (1950), *es sorprendente lo poco que sabe el dentista acerca de la consecución de este objetivo* (Manly y Braley, 1950). La mayoría de las estrategias terapéuticas dentales están basadas tanto en la satisfacción del paciente, como en el cumplimiento de ciertos estándares de calidad sustentados en la evidencia científica y la experiencia clínica. En este sentido, las estructuras dentales faltantes son reemplazadas y las superficies oclusales son reconstruidas de la manera más aproximada a sus contrapartes naturales. Sin embargo, los procedimientos odontológicos casi nunca son evaluados objetivamente desde el punto de vista de la función masticatoria (Manly y Braley, 1950; Olthoff et al., 1984; A van der Bilt, Mojet, Tekamp, y Abbink, 2010).

La evaluación objetiva de la función masticatoria puede realizarse en dos maneras: primero, cuantificando los cambios que sufre el alimento durante la masticación, esto es, el Rendimiento Masticatorio (masticatory performance, MP); y en segundo lugar, calculando el número de ciclos masticatorios que se requieren para alcanzar un cierto nivel de degradación en el alimento, esto es, la Eficiencia Masticatoria (masticatory efficiency, ME) (Bates, Stafford, y Harrison, 1976). Cabe destacar que tanto el Rendimiento Masticatorio como la Eficiencia Masticatoria no

son ampliamente utilizados en la clínica odontológica, principalmente debido a la dificultad que pueden llegar a plantear los procedimientos necesarios para su correcta evaluación; siendo este uno de los motivos por los que surge el presente trabajo de investigación.

Varios estudios han hecho uso del Rendimiento y Eficiencia Masticatoria dentro del contexto de la investigación científica, principalmente para evaluar el impacto de tratamientos protéticos y ortodónticos (Endo et al., 2014; Magalhães et al., 2014; Neill y Roberts, 1973), desordenes neuromusculares en adultos mayores (A van der Bilt et al., 2010), para evaluar los niveles de discapacidad funcional luego de un accidente cerebrovascular (Dai et al., 2014; M Schimmel et al., 2011; Yamashita et al., 1999), y ha sido asociado al riesgo de malnutrición (Gil-Montoya, Subirá, Ramón, y González-Moles, 2008; Martin Schimmel et al., 2015).

A continuación, se describirá en detalle estas dos estrategias de evaluación de la función masticatoria; enfocándose tanto en los aspectos clínicos, metodológicos, procedimentales y matemáticos que sustentan las métricas.

2.1. El Rendimiento Masticatorio

El rendimiento masticatorio (MP) es un indicador objetivo de la función masticatoria (Andries van der Bilt, 2011); y se define como el grado de conminución que alcanza el alimento bajo condiciones estandarizadas de laboratorio («The Glossary of Prosthodontic Terms», 2005). Esta definición es la más aceptada por la comunidad científica, aunque varios estudios emplean los términos Rendimiento Masticatorio y Eficiencia Masticatoria de manera intercambiable (M Schimmel et al., 2007). Por lo tanto, en este trabajo se considerará como Rendimiento Masticatorio a todo procedimiento dedicado a evaluar la función masticatoria a partir de la cuantificación de la degradación del alimento de prueba.

Desde principios del siglo 20 varios investigadores han propuesto diversos procedimientos para evaluar el MP. El procedimiento que sentó las bases de la cuantificación de la degradación del alimento producto de la masticación fue propuesto por Gaudenz en el año 1900, el cual propuso que la masticación puede ser

evaluada de manera objetiva al medir el tamaño de los fragmentos del alimento sometido a cierto número de ciclos masticatorios (Gaudenz, 1900). A partir de este estudio se pudo determinar que algunos alimentos eran más sensibles que otros a la actividad masticatoria. Por ejemplo, los cacahuets son triturados en trozos cada vez más pequeños de una manera predecible, mientras que es muy difícil evaluar de manera precisa los cambios producidos por la masticación en las carnes rojas (Rissin, House, Manly, y Kapur, 1978). Asimismo, muchos otros alimentos fueron propuestos en esta época: almendras, clara de huevo cocido, patatas cocidas, manzana, zanahoria, pan, coco, maíz, entre otras (Manly y Braley, 1950).

2.1.1. Cuantificación del tamaño medio de las partículas.

En el año 1950 Manly y Braley publican lo que sería uno de los estudios de referencia más completos acerca del MP hasta nuestros días. En este se destaca una de las primeras definiciones del MP, y una de las primeras diferenciaciones con el ME. Esto es importante, porque el MP y el ME no deberían ser conceptos intercambiables, ya que evalúan aspectos diferentes de la función masticatoria. El trabajo presentado por Manly y Braley se enfocó en la evaluación del MP, mediante el estudio de la distribución del tamaño de las partículas en el alimento de prueba sometido a la masticación, con el objetivo de establecer cuáles criterios de esta distribución deberían ser utilizados como el indicador para el MP (Manly y Braley, 1950).

En aquel estudio se empleó 25 sujetos jóvenes, completamente dentados y sin compromiso masticatorio, a los que se les instruyó que masticasen una muestra de 15 gramos de cacahuets divididos en 5 porciones de 3 gramos cada una. Se contó el número de ciclos masticatorios de manera silenciosa, y se detuvo la masticación al alcanzar 20 ciclos masticatorios. Los cacahuets masticados se expelieron de la boca a un vaso que contenía 50 c.c. de una solución de detergente al 0,3%. Los restos de alimento y la solución de detergente fueron agitadas suavemente usando una vara de cristal para romper los grumos. Luego, los contenidos del vaso fueron vertidos en una serie de tamices anidados con rejillas estandarizadas de tamaño 10, 20, 40, 80, y 200 según los estándares de Estados Unidos. Con este procedimiento se consiguió

que las partículas más finas atravesasen todos los tamices, mientras que las partículas de tamaños intermedios quedasen atrapadas entre los tamices. La Figura 1 ilustra la manera en la que las partículas de alimento de diferentes tamaños quedaban atrapadas en los tamices. Los contenidos de cada nivel de tamizado luego fueron colocados sobre un papel de filtro, y secados en un horno a 100° C durante tres horas, luego transferidos a un desecador por dos horas, y pesados con una precisión de centigramos. Los resultados de Manly y Braley (1950) sugieren que existe una correlación entre la cantidad de alimento que atraviesa los tamices con el logaritmo del número de ciclos masticatorios. El procedimiento en su totalidad requiere un tiempo operatorio de alrededor de 6 horas para realizarse correctamente; además requiere de equipamiento especializado como hornos y equipos para desecar el alimento de prueba.

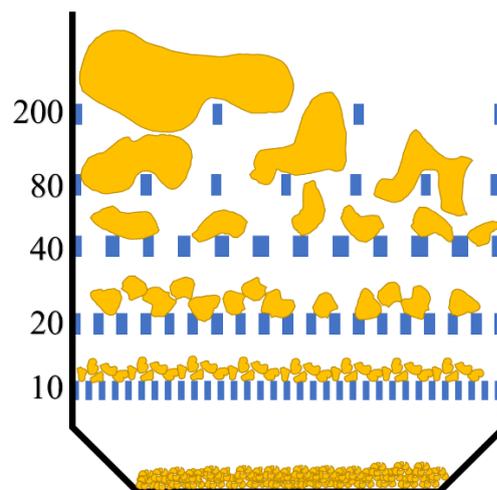


Figura 1 Ilustración de la distribución de partículas de alimento de prueba que atraviesan una serie de tamices anidados según el método de Manly y Braley (1950).

La metodología presentada por Manly y Braley (1950) se inspiró en investigaciones anteriores acerca de la distribución del tamaño de las partículas obtenidas por la pulverización de minerales para la industria de la construcción (Austin, 1939; Hatch y Choate, 1929). Sin embargo, aquel estudio no proveyó de un modelo matemático completo para el MP, aunque sentó las bases para las investigaciones sobre métodos similares.

Basado en el principio de que el MP de un individuo puede ser medido al determinar su capacidad para triturar o pulverizar el alimento, Olthoff et al. (1984) publicaron un estudio orientado a determinar si la información acerca del tamaño de las partículas del alimento sometido a la masticación podía ser expresada mediante una ecuación matemática, caracterizada por unas pocas variables, y sin perder información esencial (Olthoff et al., 1984). Comprobaron que la ecuación de Rossin-Rammler describe adecuadamente la distribución del tamaño de las partículas de un alimento de prueba artificial compuesto del material de impresión Optosil™ (Rosin y Rammler, 1933). En este caso se utilizó la siguiente forma de la ecuación de Rossin-Rammler:

$$Q_{\bar{w}} = 100 \left\{ 1 - e^{\left[-\left(\frac{x}{x_{50}} \right)^b \cdot \ln 2 \right]} \right\} \quad \text{Eq. 1}$$

Donde $Q_{\bar{w}}$ es el porcentaje de peso de las partículas con un tamaño menor a x , x_{50} es la media en milímetros de la apertura de un tamiz teórico por el cual puede atravesar el 50% de todo el peso del alimento de prueba, y b es un parámetro que indica la amplitud de la distribución ($0 < b < \infty$). Olthoff et al. Determinaron los valores de x_{50} y b usando ajuste de curvas de distribuciones, empleando el método de mínimos cuadrados. Finalmente, determinaron que la relación entre x_{50} y el número de ciclos masticatorios (N) puede explicarse con la siguiente ecuación:

$$x_{50} = \frac{c}{N^d} \quad \text{Eq. 2}$$

Donde c y d son dos variables que describen la velocidad de reducción del tamaño medio de partículas en función del número de ciclos masticatorios ($c, d \in \mathbb{R}^+$). La **Figura 2** muestra un ejemplo de este modelo aplicado a dos individuos, el primero con compromiso masticatorio por pérdida de dientes (sujeto A), y el segundo sin compromiso masticatorio (sujeto B). Olthoff et al. (1984) computaron las variables c y d correspondientes a ambos individuos como: $c = 19.2$; $d = 0.32$ para el sujeto A, y $c = 24.6$; $d = 0.52$ para el sujeto B. Es importante notar que la curva que representa al sujeto B decrece más rápidamente que la que representa al sujeto A.

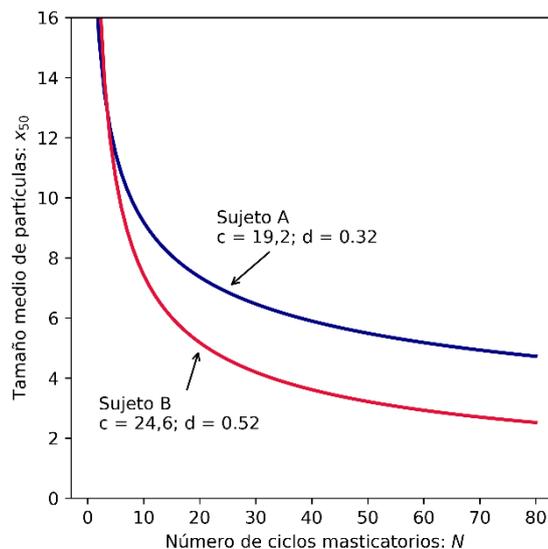


Figura 2 Ejemplo de la aplicación del método de Olthoff et al. (1984) para relacionar el número de ciclos masticatorios con el tamaño medio de las partículas, aplicado dos sujetos: A y B; donde el sujeto A tiene compromiso masticatorio por pérdida de dientes, y el sujeto B es completamente dentado y sin compromiso masticatorio.

El comportamiento observado en relación al tamaño medio de las partículas versus el número de ciclos masticatorios se repite los resultados arrojados por estudios posteriores en este campo, donde los individuos con capacidades masticatorias disminuidas tienden a obtener valores de degradación del alimento inferiores; por ejemplo, mayor tamaño de partículas, menor grado de mezcla, entre otros (Cunha et al., 2013; Deniz y Kulak Ozkan, 2013; Käyser y van der Hoeven, 1977; Mendonca et al., 2009; Olthoff et al., 1984; Rissin et al., 1978; M Schimmel et al., 2007; Andries van der Bilt, 2011; Andries van der Bilt, Burgers, van Kampen, y Cune, 2010).

Una inspección a mayor profundidad de la Figura 2 sugiere la existencia de al menos tres fases distintas del proceso de conminución del alimento. En este trabajo se denomina a estas tres fases como (1) *inicio de la masticación*, (2) *conminución rápida* y (3) *conminución lenta*. Un ejemplo de estas tres fases se muestra en la Figura 3 empleando los mismos datos del experimento de Olthoff et al. (1984). Se considera el inicio de la masticación como el momento en el cual el alimento es ingerido y previo a que este sea afectado por las fuerzas de la masticación; por lo tanto, es el momento $N = 0$. Luego, la mayor parte del alimento es triturado y pulverizado durante la fase de conminución rápida, lo que se representa en curva como la pendiente más pronunciada. Finalmente, la

constitución del bolo es completada en la fase de conminución lenta, donde el alimento alcanza el estado que algunos autores denominan como *grado estándar de conminución*, esto es, el mayor grado de degradación que alcanza el alimento en una prueba estandarizada (Manly y Braley, 1950; M Schimmel et al., 2007).

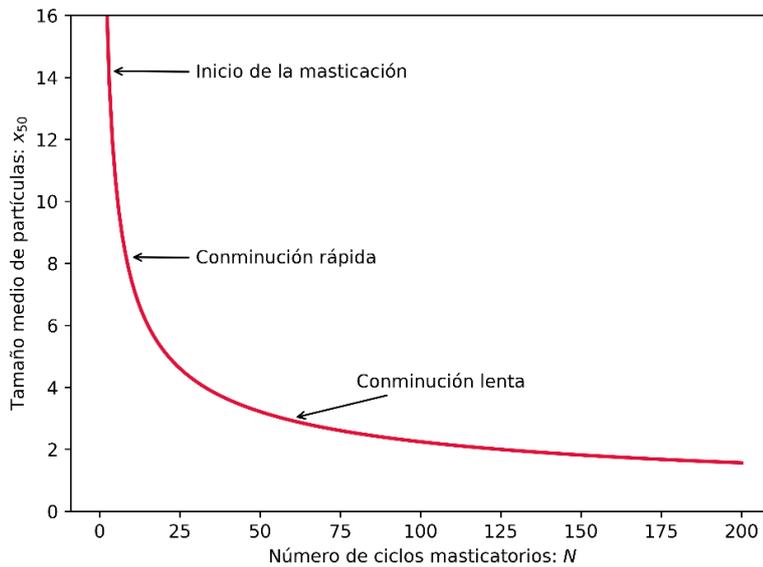


Figura 3 Fases del proceso de conminución del alimento.

Sin embargo, es posible notar rápidamente que no es posible emplear la Eq. 2 para evaluar el inicio de la masticación tal como se ha establecido, ya que la ecuación no está definida en $N = 0$. Por otra parte, es seguro asumir que el grado estándar de conminución está más relacionado a las propiedades físicas del alimento de prueba y a los procedimientos de medición que al individuo sobre el cual se realiza el análisis. Por ejemplo, las partículas del alimento de prueba basadas en Optocal/Optosil™ pueden ser trituradas indefinidamente, y si se considera un número lo suficientemente grande de ciclos masticatorios, entonces el grado estándar de conminución medido en tamaño medio de partículas x_{50} siempre será cero:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (x_{50}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{c}{Nd} \right) = 0 \quad \text{Eq. 3}$$

Está claro que existe un límite real al número de ciclos masticatorios que una persona puede aplicar sobre el alimento de prueba; pero la Eq. 3 sugiere que, cuando el número de ciclos masticatorios es grande, se disminuyen las diferencias entre el tamaño medio de partículas obtenidas de individuos sanos y aquellos con

compromiso masticatorio. Por lo tanto, se vuelve necesario establecer un número fijo de ciclos masticatorios sobre el cual realizar los análisis y comparaciones que preferiblemente se encuentre al inicio de la fase de conminución lenta. En este contexto, para varios autores, el número de ciclos masticatorios en el cual se alcanza un grado estándar de conminución es $N = 20$ (Halazonetis et al., 2013; Hama, Kanazawa, Minakuchi, Uchida, y Sasaki, 2014a; M Schimmel et al., 2011).

Con el propósito de facilitar el cálculo del x_{50} varios estudios han propuesto técnicas que hacen uso del análisis de imágenes digitales para reemplazar la necesidad de tamizado (Mowlana, Heath, van der Bilt, y van der Glas, 1994; A. van der Bilt, van der Glas, Mowlana, y Heath, 1993). En este caso, destaca el trabajo presentado por Eberhard et al. (2012), quienes desarrollaron un procedimiento de escaneado 2D que podría proveer resultados similares al tamizado en una fracción del tiempo necesario (Eberhard et al., 2012).

En el trabajo presentado por Eberhard et al. (2012) se instruyó a un grupo de 20 sujetos (10 hombres y 10 mujeres) jóvenes, completamente dentados y sin compromiso masticatorio, a masticar bloques de un alimento de prueba artificial compuesto de la silicona Optosil Confort™ (Heraeus Kulzer, Hanau, Alemania) durante 15 ciclos masticatorios. Las partículas del alimento masticado fueron posteriormente expelidas y colocadas en un papel de filtro. Las partículas recolectadas por cada participante fueron secadas con aire y desinfectadas con alcohol absoluto. Luego, estas partículas fueron colocadas sobre una loseta de cristal transparente de 20 × 30 cm y dispersadas manualmente usando un pincel fino para evitar aglomeraciones. Se colocó una caja oscurecida con papel negro de 30 × 40 cm sobre la loseta de cristal para minimizar los reflejos del fondo. Se reporta que el proceso de escaneado tardó en promedio 6 minutos por paciente. Se digitalizó las partículas sobre la loseta de cristal empleando un escáner plano de mesa, en escala de grises, a 8 bits, con 1200 dpi. El color y el contraste de las imágenes resultantes se ajustó automáticamente con la herramienta Image J (Wayne Rasband, National Institutes of Health), para posteriormente ser binarizadas a blanco y negro considerando un umbral de grises de 128. Las imágenes en blanco y negro fueron analizadas mediante un software de reconocimiento de patrones automáticos para extraer características de los componentes de la imagen: el largo de los bordes del

rectángulo más pequeño que contiene a una partícula, el área de la partícula, el largo medio de los ejes mayor y menor de la elipse que se ajusta mejor a la partícula, la orientación y el centroide de la partícula, el ratio de aspecto, la redondez y la solidez.

El cálculo del tamaño de cada una de las partículas se realizó en una hoja de cálculo de Excel (Microsoft Office Excel 2007). Finalmente, se computó el x_{50} mediante un proceso de regresión utilizando la distribución de Rossin-Rammler. Es importante notar que en el trabajo de Eberhard et al. (2012) no se explica los modelos matemáticos de extracción de las características de las partículas, sino que simplemente se empleó las herramientas existentes en el software de procesamiento de imágenes elegido. Por lo tanto, es difícil replicar el experimento empleando otras herramientas que no sean las indicadas en el artículo, por ejemplo, mediante el desarrollo de nuevas herramientas especializadas para esta tarea.

En la actualidad, los procedimientos de evaluación del MP basados en la cuantificación del tamaño medio de las partículas x_{50} es considerado el Gold-Standard de la técnica. Sin embargo, la dificultad que tienen este tipo de procedimientos afecta su utilización en entornos clínicos. Además, algunos estudios proponen que los alimentos de prueba frágiles y duros como el Optosil/OptocalTM no son adecuados para analizar la función masticatoria de pacientes edéntulos o con fuerza máxima de mordida disminuida (Speksnijder et al., 2009; A van der Bilt et al., 2010).

2.1.2. Análisis de mezcla

Otra de las maneras más aceptadas por la comunidad científica para evaluar el rendimiento masticatorio son los procedimientos basados en cuantificar los cambios en los colores de un alimento de prueba cohesivo sometido a la masticación (Endo et al., 2014; Halazonetis et al., 2013; Hama et al., 2014a; Hama, Kanazawa, Minakuchi, Uchida, y Sasaki, 2014b; Prinz, 1999; M Schimmel et al., 2007). Este tipo de procedimientos se consideran como más adecuados para pacientes adultos mayores, edéntulos o pacientes con compromiso masticatorio donde no se pueda emplear procedimientos basados en fragmentación (A van der Bilt et al., 2010;

Andries van der Bilt, 2011). En la Figura 4 se muestra un ejemplo de una goma de mascar bicolor empleada como alimento de prueba para el test de análisis de mezcla.

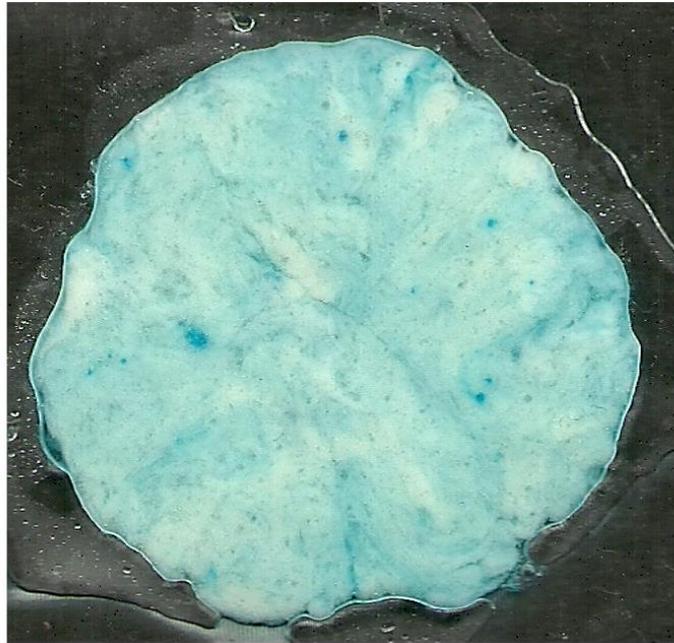


Figura 4 Ejemplo de goma de mascar bicolor sometida a la masticación.

Dentro de los procedimientos basados en colorimetría destacan los denominados como métodos de análisis de mezcla (A van der Bilt et al., 2010). Prinz publicó en 1999 uno de los primeros estudios donde se propone emplear métodos colorimétricos para evaluar la mezcla que alcanza una goma de mazar bicolor. Prinz (1999) empleó algoritmos de extracción de características personalizados sobre imágenes en escalas de grises. Sin embargo, sus resultados mostraron una alta variabilidad; además, los algoritmos propuestos y las herramientas empleadas no están disponibles públicamente, por lo que se hace muy difícil replicar este procedimiento.

Posteriormente, Schimmel et al. (2007) propusieron un método simplificado para la cuantificación de la mezcla en gomas de mascar bicolors sometidas a la masticación. En aquel estudio se instruyó a veinte voluntarios jóvenes, completamente dentados y sin compromiso masticatorio a masticar cinco porciones de goma de mascar Hubba-Bubba® («The Wrigley Company Ltd», 2016) en el lado preferido de masticación durante 5, 10, 20, 30 y 50 ciclos masticatorios

respectivamente. Los bolos resultantes fueron expelidos dentro de bolsas de plástico transparentes. Luego, las muestras fueron aplanadas hasta alcanzar 1 mm de espesor empleando una prensa. Las muestras aplanadas fueron escaneadas con un escáner plano de mesa a una resolución de 500 dpi. Posteriormente, se empleó con éxito la herramienta de selección *varita mágica* del software para edición de imágenes Adobe Photoshop Elements® (Adobe Inc.) para seleccionar y contar la cantidad de píxeles en la imagen correspondientes a la parte “no mezclada” del bolo (M Schimmel et al., 2007). A partir de esto, se computó la “fracción no mezclada” de manera semi manual empleando una hoja de cálculo de Excel (Microsoft Office Excel). El procedimiento propuesto por Schimmel et al. (2007) marcó un avance significativo en los procedimientos opto-electrónicos de valoración del rendimiento masticatorio, ya que facilitaba en gran medida la tarea, y la acercaba más a la clínica odontológica diaria.

Sin embargo, el procedimiento de Schimmel et al. (2007) depende en gran manera del operador, ya que pequeñas variaciones en la utilización de la herramienta de varita mágica producen resultados diferentes en el conteo de píxeles. Además, el procedimiento seguía requiriendo una cantidad importante de tiempo, por lo que estudios posteriores intentaron mejorar esta técnica.

El trabajo publicado por Halazonetis et al. en el 2013 presentó una novedosa herramienta especializada para analizar el grado de mezcla en gomas de mascar bicolor llamada ViewGum© (dHAL Software. Kifissia, Greece, www.dhal.com) (Halazonetis et al., 2013); la cual está fundamentada en la teoría planteada por Schimmel et al. (2007). ViewGum© fue posteriormente probada por Schimmel et al. en el 2015 para tres tipos de gomas de mascar que actualmente están disponibles en Turquía y Japón (Martin Schimmel et al., 2015). El sistema de ViewGum© emplea una instancia del algoritmo de segmentación de Bai y Sapiro para aislar el bolo alimenticio del fondo de la imagen (Bai y Sapiro, 2007); luego mide la varianza circular del tono, esto es, el canal H del espacio de color HSI. A esta característica extraída de las imágenes se la denominó como CVOH; además, se empleó la raíz cuadrada del CVOH como otro indicador de la mezcla, denominado SDHue (Halazonetis et al., 2013). Sin embargo, se ha reportado que el CVOH puede no ser ideal cuando se emplean gomas de mascar de color blanco (Martin Schimmel et al.,

2015), por lo que se limita el rango de potenciales combinaciones de colores en los alimentos de prueba.

2.2. La Eficiencia Masticatoria

La Eficiencia Masticatoria, (Masticatory Efficiency, ME), ha sido definida previamente como el número extra de ciclos masticatorios que el paciente necesita para alcanzar el mismo nivel de pulverización que una persona estándar (Manly y Braley, 1950); sin embargo, la medición estricta del ME según esta definición no se utiliza, ya que su medición implicaría que los pacientes con masticación limitada masticasen el alimento de prueba durante largos periodos de tiempo. Por otra parte, los términos ME y MP se utilizan de manera intercambiable en varios estudios cuando en realidad se refieren al MP por definición. Partiendo de esto, no existen estudios previos a este trabajo que intenten resolver el problema de la medición del ME siguiendo la definición tradicional. Esto es importante ya que el ME podría proveer de información útil para el diagnóstico de la función masticatoria; por lo que se hace necesario contar con procedimientos fiables que permitan su evaluación. Por lo tanto, más adelante en este trabajo se presenta una nueva definición del ME junto con un nuevo modelo de diagnóstico.

II. JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

1. JUSTIFICACIÓN

1.1. El problema del análisis del Rendimiento la Eficiencia Masticatoria

Como se ha expuesto en el Capítulo I, la función masticatoria puede ser evaluada de manera objetiva al cuantificar los cambios que sufre un alimento de prueba sometido a la masticación, esto es, el Rendimiento Masticatorio (MP). Por otra parte, es posible inferir la cantidad de ciclos masticatorios necesarios para alcanzar un grado de trituración del alimento estándar, esto es, la Eficiencia Masticatoria (ME). Ambos métodos presentan dificultades para su ejecución derivadas de la complejidad de los procedimientos, de los recursos de equipamiento y tiempo necesarios para llevarlas a cabo.

Se considera a las técnicas de análisis de imágenes digitales para la cuantificación de la mezcla en gomas de mascar bi-colores como los métodos más rápidos, económicos y eficientes para diagnosticar el MP, especialmente en personas de edad avanzada, edéntulos totales, y personas con capacidades motoras disminuidas (M Schimmel et al., 2011; Andries van der Bilt, 2011). Sin embargo, la mayoría de los algoritmos o herramientas empleadas para analizar la mezcla de la goma de mascar no está completamente documentados.

La mezcla puede ser cuantificada a partir de varias características del bolo resultante; pero los procedimientos existentes de cuantificación de la mezcla se fundamentan en la evaluación de una única característica del bolo alimenticio como indicador del MP, tales como los algoritmos denominados UF (M Schimmel et al., 2007), SDHue (Halazonetis et al., 2013), CVOH (Martin Schimmel et al., 2015), DiffPix (Weijenberg et al., 2013), entre otros (Hama et al., 2014a; Prinz, 1999).

En este contexto, es importante resaltar que las estrategias anteriormente mencionadas (UF, SDHue, CVOH, DiffPix, etc.) fueron presentadas sin estudios comparativos contra otros procedimientos de análisis de imágenes ampliamente utilizados, como pueden ser la extracción de características simple de los píxeles de la imagen o el análisis estadístico de los histogramas; los cuales tienen una amplia documentación en sus aplicaciones en otras áreas (Bron et al., 2015; Gertych, Ma, Tajbakhsh, Velásquez-Vacca, y Knudsen, 2015). Más aún, la utilidad de cualquier procedimiento de análisis de imágenes recae en las propiedades de la imagen siendo

analizada (Nixon, 2008), lo que a su vez se corresponde con la combinación de colores y características estructurales del alimento de prueba. Además, se conoce que la disponibilidad del alimento de prueba no es consistente a nivel mundial (Martin Schimmel et al., 2015; Andries van der Bilt, 2011), ni a lo largo del tiempo. Por ejemplo, un método de cuantificación de la mezcla diseñado para operar sobre gomas de mascar verdes y rojas de marca Trident™ que se venden en Europa no será válido para ser utilizado con gomas de mascar marca Lotte™ que se venden comúnmente en Asia debido a las diferencias de sus tonalidades. Por lo tanto, se hace necesario contar con un procedimiento que permita ajustar y compensar por estas diferencias.

Consecuentemente, se hace necesario superar algunos obstáculos conceptuales y procedimentales. En primer lugar, ¿cuál característica del bolo alimenticio debe ser considerado como el indicador de mezcla?, esto es importante ya que existe una cantidad ilimitada de formas de describir las características en una imagen digital. Y, en segundo lugar, ¿cómo se ven las gomas de mascar mezcladas al 0%, 25%, 50%, etc.?, y por lo tanto ¿cuándo puede considerarse que una goma de mascar se encuentra mezclada totalmente?

Por otra parte, no existen técnicas documentadas para evaluar objetivamente el ME. Es posible que esto se deba a que, tal como está definido (ver Cap. II, Sec. 2.2), se requiere que el paciente mastique durante un gran número de ciclos masticatorios para poder establecer un diagnóstico fiable del ME; y, por otra parte, otros estudios sostienen que los seres humanos no compensan una deficiencia en la masticación aumentando el número de ciclos masticatorios, sino que tienden a deglutir el alimento sin alcanzar un nivel de degradación adecuado (Prinz, 1999). Sin embargo, esto no significa que se deba descartar la idea de evaluar el ME, sino que más bien, sugiere la necesidad de revisar y corregir la definición de ME para adaptarla a las nuevas herramientas tecnológicas de apoyo al diagnóstico con las que se cuenta en la actualidad.

1.2. Nuevas definiciones para el Rendimiento y la Eficiencia Masticatoria

En este estudio se redefine el MP y ME bajo la premisa de que es posible identificar patrones en las características visuales de especímenes de goma de mascar bicolor masticados.

Se redefine al Rendimiento Masticatorio o MP como: *el set de medidas que caracteriza el estado de un espécimen de alimento de prueba sometido a un número de ciclos masticatorios*. Esto es una ampliación de la definición original propuesta en el Glosario de Términos Prostodónticos, y que toma en cuenta múltiples características del bolo alimenticio en lugar de una única medida para establecer el indicador. Matemáticamente, según esta nueva definición, el MP se expresa como:

$$MP_T = (c_1, c_2, \dots, c_k) \quad \text{Eq. 4}$$

Donde MP_T representa el Rendimiento Masticatorio para T ciclos masticatorios, y $c_i, i = 1 \dots k$ representan las k características (c_i) extraídas del espécimen de bolo alimenticio siendo analizado. Esta nueva definición es retro-compatible con la definición original cuando $k = 1$; por ejemplo, se puede modelar el indicador de Rendimiento Masticatorio propuesto en el estudio de Halazonetis et al (2013) como $MP_{20} = (SDHue)$, dado que extrae el descriptor SDHue de los píxeles de la imagen de una goma de mascar bicolor masticada durante 20 ciclos masticatorios.

Por otra parte, se redefine a la Eficiencia Masticatoria o ME como: *el ratio entre el número de ciclos masticatorios que un individuo de referencia sano necesitaría para alcanzar un nivel de mezcla similar al del paciente contra el número real de ciclos masticatorios aplicados sobre el alimento de prueba bajo condiciones experimentales controladas*. El aspecto clave de esta nueva definición del ME es el cálculo del número de ciclos masticatorios que producirían un MP similar en una población de referencia. Matemáticamente, el ME se expresa como:

$$ME = \frac{P}{T} \quad \text{Eq. 5}$$

Donde ME es la eficiencia masticatoria, P es el número de ciclos masticatorios equivalentes realizados por un individuo ideal de una población de referencia saludable, y T es el número de ciclos masticatorios reales aplicados sobre la muestra. Consecuentemente, un ME de 0 implicaría una ausencia total de mezcla,

un ME de 1 implicaría un nivel de mezcla normal, esto es, comparable a lo que una persona de referencia alcanzaría en el mismo número de masticaciones. Además, un ME > 1 implicaría que el paciente tiene una eficiencia masticatoria superior al de la media de referencia.

El ME también puede ser expresado como un porcentaje para facilitar su interpretación, y asociado a etiquetas como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Etiquetas asociadas a los niveles de Eficiencia Masticatoria

Etiqueta	Nivel de Eficiencia Masticatoria
Completamente impedida	0%
Impedida	25%
Limintada	50%
Adecuada	75%
Normal	100%
Mejor que la norma	> 100%

2. HIPÓTESIS

En este estudio se plantean las siguientes hipótesis nulas:

- 1) Las mediciones de MP obtenidas directamente por procedimientos de análisis de imágenes tradicionales basados en la extracción de características de los píxeles de la imagen y el análisis de histogramas no son capaces de discriminar entre la mezcla provocada por diferentes números de ciclos masticatorios aplicados sobre una muestra de goma de mascar bicolor.
- 2) Un modelo de clasificación basado en técnicas de inteligencia computacional para el reconocimiento de patrones no puede reconocer el número de ciclos masticatorios aplicados sobre especímenes de goma de mascar bicolor para una población de referencia.
- 3) Un modelo de clasificación basado en técnicas de inteligencia computacional para el reconocimiento de patrones no puede

diferenciar entre los niveles de mezcla alcanzados por individuos edéntulos y la población de referencia.

- 4) No existen diferencias significativas en las mediciones de ME realizadas antes y después del tratamiento con prótesis removible total en pacientes edéntulos, cuando se emplea un modelo de clasificación basado en técnicas de inteligencia computacional para el reconocimiento de patrones como estrategia de cuantificación del ME.

3. OBJETIVOS

Este trabajo persigue los siguientes objetivos:

Objetivo General

Desarrollar un nuevo sistema de evaluación de Eficiencia y Rendimiento Masticatorio basado en el reconocimiento automático de patrones de mezcla de gomas de mascar bicolores sometidos a la masticación, empleando una combinación de inteligencia computacional y técnicas de procesamiento de imágenes.

Objetivos Específicos

- 1) Analizar la correlación existente entre el número de ciclos masticatorios y las mediciones de MP obtenidas a partir de procedimientos de análisis de imágenes basados en la extracción de características de los píxeles y el análisis de histogramas.
- 2) Establecer un proceso de selección de procedimientos de análisis de imágenes óptimos para la medición del MP para los alimentos de prueba disponibles para el estudio.
- 3) Modelar un sistema experto para reconocimiento de patrones de mezcla en gomas de mascar bicolores.
- 4) Validar el sistema experto propuesto en la muestra de estudio y evaluar las posibles limitaciones del modelo como método de diagnóstico del ME.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. PARTICIPANTES

Los participantes fueron reclutados en la Universidad de Guayaquil, Ecuador. En todos los casos se requirió de un consentimiento informado a los participantes, y se obtuvo un permiso especial del Comité de Ética para la Experimentación Humana y Animal de la Universidad de Guayaquil.

1.1. Grupo de Referencia para calibración (G_r):

Se reclutaron 250 voluntarios, 130 mujeres con media de edad de $25 \pm 5,8$ años, y 120 varones con media de edad de $25 \pm 6,8$ años. Los criterios de inclusión fueron: tener entre 18 y 35 años, tener al menos 28 dientes naturales, oclusión de Clase I de Angle e índice CPOD de 2 o menos. Los criterios de exclusión fueron: presentar síntomas de disfunción de la articulación temporomandibular, bruxismo, dolor orofacial y la presencia de aparatología ortodóntica fija o removible.

1.2. Grupo de Referencia para validación (G_v):

Se reclutaron 80 voluntarios, 41 mujeres con media de edad de $25 \pm 4,2$ años, y 39 varones con media de edad de $25 \pm 5,8$ años. Los criterios de inclusión fueron: tener entre 18 y 35 años, tener al menos 28 dientes naturales, oclusión de Clase I de Angle e índice CPOD de 2 o menos. Los criterios de exclusión fueron: presentar síntomas de disfunción de la articulación temporomandibular, bruxismo, dolor orofacial y la presencia de aparatología ortodóntica fija o removible.

1.3. Grupo de diagnóstico (G_d):

Se reclutaron 40 voluntarios, 21 mujeres con media de edad de $73 \pm 8,7$ años, y 19 varones con medida de edad de $72 \pm 9,1$ años. Los sujetos fueron pacientes de la clínica de prótesis dental de la Facultad de Odontología de la Universidad de Guayaquil, Ecuador. Los criterios de inclusión fueron: tener más de 60 años, y edentulismo maxilar y mandibular. Los criterios de exclusión fueron presentar síntomas de disfunción de la articulación temporomandibular, dolor orofacial, y deterioro cognitivo severo.

2. ALIMENTO DE PRUEBA

El alimento de prueba seleccionado para este estudio se compuso de dos láminas de gomas de mascar marca Trident®, una de sabor Sandía con tonalidad roja, y otra de sabor Menta con tonalidad blanca. Se seleccionó estos colores por ser los suficientemente diferentes como para poder discernir entre ambos durante el proceso de masticación. Las láminas de goma de mascar medían $2,5 \times 9 \times 39$ mm, y los especímenes bicolors se formaron manualmente juntando láminas de color rojo y blanco.

3. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS

3.1. Protocolo de recolección de muestras

El proceso de recolección de muestras fue similar para todos los grupos, diferenciándose únicamente en la cantidad de muestras recogidas por individuo. A continuación, se describe el proceso de recolección para una muestra:

Un operador instruye al paciente para masticar una goma de mascar bicolor durante un número (T) de ciclos masticatorios, mientras cuenta silenciosamente el número de ciclos. Al alcanzar el número de ciclos masticatorios establecido, el operador instruye al paciente a detener la masticación y devolver el alimento de prueba masticado. Luego, el sujeto expelle el bolo resultante entre dos láminas de plástico transparente fino. Finalmente, el espécimen es prensado entre las láminas de plástico transparente hasta alcanzar 1 mm de espesor empleando una prensa de tornillo calibrada.

En este contexto, los sujetos en el grupo G_r masticaron un total de 8 especímenes cada uno, durante $T = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21$ y 25 ciclos masticatorios respectivamente. Los sujetos en el G_r descansaron durante $30 \sim 60$ segundos entre sesiones de masticación para evitar la fatiga. Los sujetos en el grupo G_v masticaron un total de 5 especímenes cada uno, durante $T = 0, 5, 10, 15$ y 20 ciclos masticatorios respectivamente; asimismo, descansaron durante $30 \sim 60$ para evitar la fatiga.

Finalmente, los sujetos en el G_a masticaron un total de 4 especímenes cada uno, divididos en dos sesiones. Primero, se recolectaron dos muestras consecutivas previo al tratamiento con prótesis dentales totales, y luego se recolectaron otras dos muestras 30 días después del tratamiento; donde en todos los casos los pacientes masticaron durante T = 20 ciclos masticatorios, y descansando durante 30 ~ 60 segundos entre sesiones de masticación.

3.2. Digitalización

Las muestras prensadas fueron escaneadas inmediatamente empleando un escáner plano de mesa marca Canonscan Lide 220[®] a 300 dpi, con parámetros de calibración para digitalización a color estándares. Las imágenes resultantes se guardaron en formato TIFF como ficheros separados por muestra y por lado, y fueron etiquetados digitalmente con el identificador de la muestra, el número de ciclos masticatorios, y el lado de la muestra observado. La Figura 5 muestra un ejemplo de las imágenes obtenidas por el proceso de digitalización.

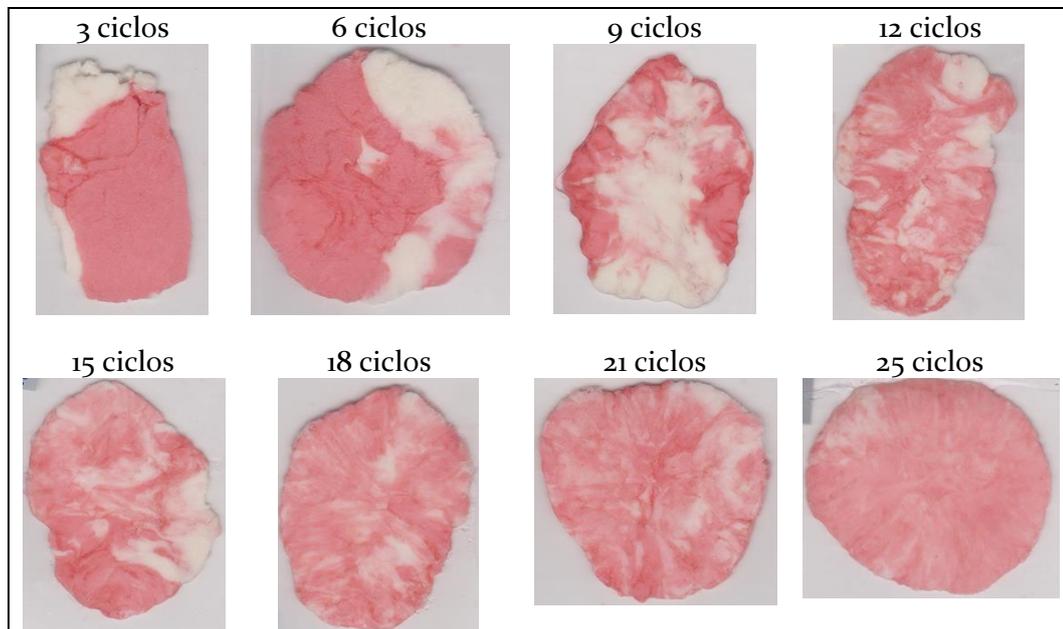


Figura 5 Ejemplo de imágenes de muestras de alimento de prueba sometido a diferentes números de ciclos masticatorios.

3.3. Segmentación de las imágenes digitales

Las imágenes resultantes fueron segmentadas para aislar el área correspondiente al bolo alimenticio contra el fondo de la imagen. Los especímenes obtenidos por esta técnica presentan bordes irregulares, fronteras borrosas y coloración heterogénea; por lo que la tarea de segmentar automáticamente las imágenes no puede ser considerada un paso trivial. En estudios previos se empleó el modelado activo de contornos como estrategia de segmentación, pero requería de la asistencia de un operador humano para contornear la forma de la goma de mascar por medio de una interfaz gráfica (Halazonetis et al., 2013); lo cual no es viable para una gran cantidad de imágenes como es el caso de este estudio, además de que el factor humano introduce variaciones al momento de ejecutar el procedimiento.

En este estudio se empleó un procedimiento de segmentación de imágenes a color completamente automatizado, especialmente construido con el propósito de identificar el bolo del alimento de prueba contra el fondo de la imagen. Este algoritmo se diseñó a partir de una combinación de los algoritmos MeanShift (Comaniciu y Meer, 2002), DistanceMap (Peláez, Martínez, Vaccaro, y Yanez, 2016) y K-Means (MacQueen, 1967).

La variante del algoritmo de MeanShift empleado está basada en la estimación de un núcleo de densidad (kernel density), por lo que no asume una morfología predeterminada en la imagen, y ha sido utilizado exitosamente en estudios anteriores para la segmentación de imágenes a color en ámbito biomédico (Veredas, Mesa, y Morente, 2010). En este caso, los píxeles de la imagen son considerados como muestras aleatorias extraídas de una función de densidad de probabilidad (PDF); donde los picos de la PDF se corresponden con la moda estadística de los datos. Luego, la información de la imagen es dividida en clústeres al asociar a cada punto con su moda. Matemáticamente, sea $g(x)$ una función de núcleo radial simétrico, sea h un parámetro controlado por el usuario que define el radio de una ventana, y $x_i, i = 1, \dots, n$ un set de puntos en el espacio d -dimensional R^d ; por cada punto x_k ($1 \leq k \leq n$), la secuencia de ubicaciones sucesivas del núcleo $y_j, j=0,1,2,\dots$ se define como:

$$y_{j+1} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i g\left(\left\|\frac{y_j - x_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{y_j - x_i}{h}\right\|^2\right)} \quad \text{Eq. 6}$$

donde $y_0 = x_k$. El algoritmo de MeanShift realiza un descenso de gradiente en la PDF; por lo tanto, la secuencia y_j converge a su moda. Para este estudio se empleó la siguiente función de núcleo:

$$g(x) = \frac{1}{2} e^{-\frac{x}{2}} \quad \text{Eq. 7}$$

Luego de obtener los clústeres de la imagen con el algoritmo de MeanShift, se realizó un proceso de clasificación de la siguiente manera:

- 1) Se estableció el color del fondo (b) como la media del color de los clústeres ubicados en las cuatro esquinas de la imagen, donde b se corresponde con el espacio de color CIE Lab.
- 2) Por cada píxel x_i de la imagen segmentada, se computó el logaritmo de la distancia de color (d_i) entre el píxel y el color de fondo b , tal que ($d_i = \log ||x_i - b||$); con lo que se formó una nueva imagen de DistanceMap (DM).
- 3) Se clasificó los píxeles en el DM en dos nuevos clústeres usando el algoritmo de K-Means, con $k = 2$.
- 4) Se seleccionó como Región de Interés (ROI) al clúster ubicado en el centro de la imagen.
- 5) A partir de conocer la posición del ROI, se deriva la posición de los píxeles correspondientes al bolo alimenticio en la imagen original mediante un procedimiento de enmascaramiento.

Un ejemplo del resultado obtenido de la segmentación siguiendo el procedimiento anteriormente descrito se muestra en la Figura 6, donde la zona dentro de la línea azul representa el ROI de la imagen.

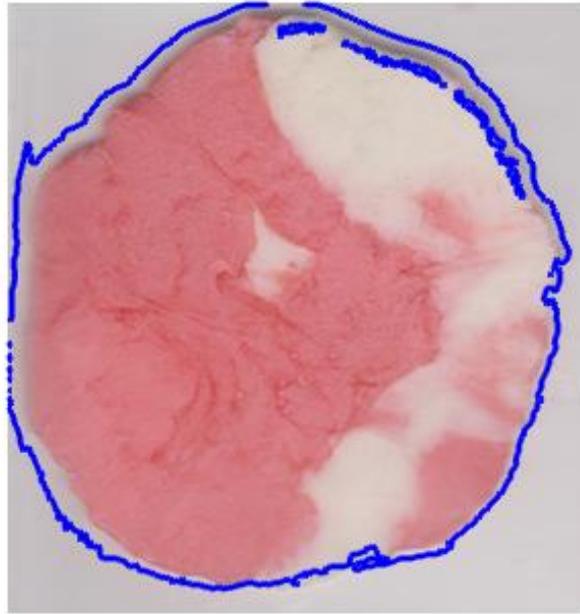


Figura 6 Ejemplo del resultado del proceso de segmentación.

3.4. Extracción de características de las imágenes

Se aplicó un conjunto de técnicas de extracción de características sobre los píxeles correspondientes al ROI de cada imagen, es decir, a la zona que comprende el bolo alimenticio. Los modelos de extracción de características empleados fueron:

- La media del valor de los píxeles (M), representando el color promedio, computado como:

$$M = \mu = \frac{\sum x_i}{A} \quad \text{Eq. 8}$$

donde x_i es el i -ésimo píxel, y A es el número total de píxeles en el ROI.

- La varianza absoluta de los píxeles de la imagen (V), representando la dispersión de los colores, computada como:

$$V = \frac{\sum |x_i - \mu|}{A - 1} \quad \text{Eq. 9}$$

- La varianza absoluta del histograma (Vh), representando la dispersión del histograma, computada como:

$$Vh = \sigma_h = \frac{\sum |H - \mu_h|}{99} \quad \text{Eq. 10}$$

donde μ_h es la media del histograma H .

- La asimetría del histograma (Sh), computada como:

$$Sh = \sum_{i=1}^{100} \frac{(h_i - \mu_h)^3}{99 \times \sigma_h^3} \quad \text{Eq. 11}$$

donde h_i es el i -ésimo bin del histograma.

- La energía del histograma (Eh), la cual es una representación discriminativa de la distribución de colores, computada como:

$$Eh = \sum_{i=1}^{100} h_i^2 \quad \text{Eq. 12}$$

- La entropía del histograma (Nh), que representa un estimador de la aleatoriedad de la distribución de colores, computada como:

$$Nh = - \sum_{i=1}^{100} h_i \times \log_2(h_i) \quad \text{Eq. 13}$$

- Las posiciones (P_1, P_2) y alturas (T_1, T_2) de los dos picos más altos del histograma (máximos locales).
- La varianza circular del tono, computada por los píxeles del canal H del espacio de color HSI, computada como:

$$CVOH = 1 - \frac{1}{A} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^A \cos(\theta_i)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^A \sin(\theta_i)\right)^2} \quad \text{Eq. 14}$$

donde θ_i es el valor del tono, y A es el número total de píxeles en el ROI.

En este trabajo no se consideró modelos de extracción de características más complejos como el Binary Participle Swarm Optimizartion, o descriptores basados en texturas tales como Wavelet debido su alto coste computacional comparado con los modelos descritos en esta sección (Veredas et al., 2010; Zhang, Wang, Phillips, y Ji, 2014).

Cada uno de los modelos de extracción de características anteriormente descritos fueron aplicados sobre cada uno de los canales de los espacios de color

RGB, HSI, CIE Luv, y RGB normalizado; exceptuando el modelo CVOH el cual solo fue aplicado sobre el canal H del espacio de color HSI. La selección del espacio de color se basó en estudios previos donde se han empleado con éxito técnicas de análisis de imágenes en biomedicina. En este caso, las imágenes originales se representan en el espacio de color RGB, el cual está indicado para la representación rápida de imágenes en 256 tonos de rojo, verde y azul. Por otra lado, el espacio de color CIE Luv es una transformación del espacio de color CIE XYZ triestímulo (Judd, 1940), el cual se usa con mucha frecuencia en computación gráfica. El espacio de color HSI representa el tono, la saturación, y la intensidad de la imagen en forma de un espacio de color cilíndrico. Finalmente, el espacio de color RGB normalizado se obtiene a partir de ejecutar un procedimiento de normalización sobre los valores del RGB; lo que permite disminuir la influencia del brillo y las fuentes de luz (Vezhnevets, Sazonov, y Andreeva, 2003). Un ejemplo de una muestra de goma de mascar examinada desde diferentes espacios de color se muestra en la Figura 7.

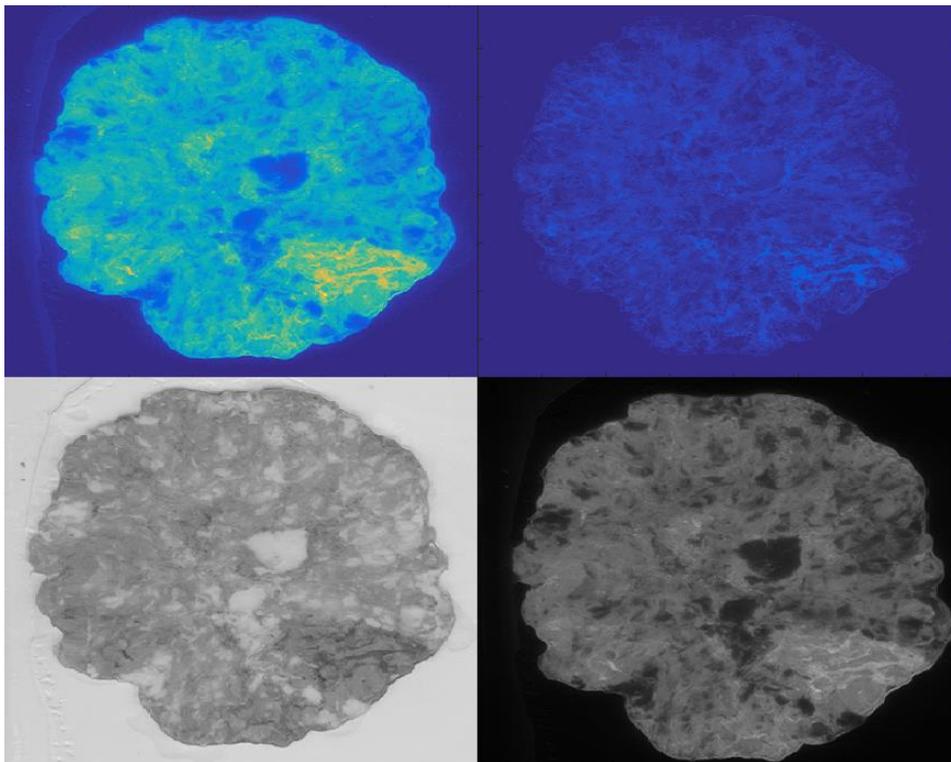


Figura 7 Ejemplo de una muestra de goma de mascar examinada desde diferentes espacios de color.

En total se extrajeron 121 características de los píxeles del ROI de cada imagen, estas características se denominan según el modelo de extracción utilizado y el canal del espacio de color analizado. La denominación de cada uno de los extractores de características se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2 Denominación de los extractores de características de imágenes digitales empleados en el estudio

Modelo de extracción	Canales del espacio de color											
	RGB			CIE L*u*v*			HSI			RGB Normalizado		
	R	G	B	L	u	v	H	S	I	Rn	Gn	Bn
Media de los píxeles	MR	MG	MB	ML	Mu	Mv	MH	MS	MI	MRn	MGn	MBn
Varianza absoluta de los píxeles	VR	VG	VB	VL	Vu	Vv	VH	VS	VI	VRn	VGn	VBn
Posiciones y valores del primer y segundo pico más altos del histograma	P1R	P1G	P1B	P1L	P1u	P1v	P1H	P1S	P1I	P1Rn	P1Gn	P1Bn
	P2R	P2G	P2B	P2L	P2u	P2v	P2H	P2S	P2I	P2Rn	P2Gn	P2Bn
	V1R	V1G	V1B	V1L	V1u	V1v	V1H	V1S	V1I	V1Rn	V1Gn	V1Bn
	V2R	V2G	V2B	V2L	V2u	V2v	V2H	V2S	V2I	V2Rn	V2Gn	V2Bn
Varianza absoluta del histograma	VhR	VhG	VhB	VhL	Vhu	Vhv	VhH	VhS	VhI	VhRn	VhGn	VhBn
Asimetría del histograma	ShR	ShG	ShB	ShL	Shu	Shv	ShH	ShS	ShI	ShRn	ShGn	ShBn
Energía del histograma	EhR	EhG	EhB	EhL	Ehu	Ehv	EhH	EhS	EhI	EhRn	EhGn	EnBn
Entropía del histograma	NhR	NhG	NhB	NhL	Nhu	Nhv	NhH	NhS	NhI	NhRn	NhGn	NhBn
Varianza circular	-	-	-	-	-	-	CVOH	-	-	-	-	-

3.5. Selección de indicadores de mezcla relevantes

La gran cantidad de características extraídas aumenta las oportunidades de diagnosticar correctamente una muestra; sin embargo, esta gran dimensionalidad podría afectar los procesos de reconocimiento de patrones que serán aplicados en etapas posteriores. En primera instancia, es posible descartar algunas de las características extraídas al computar un indicador de relevancia (q) asociado a cada característica, computado como:

$$q_i = \left(\frac{|\rho(F_i)| + \left(\frac{\gamma(F_i)}{\binom{n}{2}} \right)}{2} \right) \quad \text{Eq. 15}$$

donde F_i representa el set de mediciones obtenidas de la i -ésima característica, $\rho(F_i)$ es el coeficiente de correlación con el número de ciclos masticatorios calculado con el Rho de Spearman, $\gamma(F_i)$ es la cantidad de pares de números de ciclos masticatorios que el i -ésimo extractor de características puede identificar como estadísticamente diferentes, y n es el número de ciclos masticatorios diferentes que fueron considerados en el experimento.

En este experimento, el valor de $\gamma(F_i)$ se calculó mediante ANOVA, considerando el número de ciclos masticatorios como el factor fijo, y empleando la corrección pos hoc Bonferroni, tal que:

$$0 \leq \gamma(F_i) \leq \binom{n}{2} \quad \text{Eq. 16}$$

Este procedimiento de selección fue aplicado sobre las muestras en el grupo de referencia G_r , por lo que el número de muestras total fue de 2000 especímenes, con 4000 imágenes digitales. En este contexto, el número de ciclos masticatorios diferentes fue $n = 8$, dado que se examinaron $T = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21$ y 25 ciclos masticatorios. Gracias a este análisis se determinó cuando una característica podría ser descartada, esto es, cuando el valor de q asociado sea menor que $0,5$. Los extractores de características con valores de q superiores a $0,7$ fueron considerados como descriptores relevantes del rendimiento masticatorio.

3.6. Reducción dimensional

Se aplicó un procedimiento de reducción dimensional basado en análisis de componentes principales (PCA) sobre las medidas obtenidas de los extractores de características relevantes, convirtiendo el set de mediciones posiblemente correlacionadas en un set de componentes principales sin correlación (Jolliffe, 2002). Este paso se realizó con el propósito de mejorar el rendimiento de los procedimientos de identificación de patrones.

3.7. Aprendizaje de máquina

Esta fase comprende la identificación de patrones en las mediciones de características obtenidas con las técnicas de análisis de imágenes descritas en las

secciones anteriores. La fase de aprendizaje de máquina se realizó sobre las muestras obtenidas en el grupo de validación G_v , empleando los procedimientos de análisis de imágenes previamente obtenidos del grupo de calibración. A diferencia del grupo de calibración, el G_v consideró 5 números de ciclos masticatorios: $T = 0, 5, 10, 15$ y 20 .

La información obtenida de cada espécimen (S) del grupo G_v se puede expresar como una tupla que consiste en el MP del espécimen y el número de ciclos masticatorios (t), tal que:

$$S = (MP, t) \quad \text{Eq. 17}$$

Luego, los especímenes fueron agrupados, tal que:

$$S_i = \{S | S = (MP, x) \wedge x = t_i\} \quad \text{Eq. 18}$$

donde S_i representa el set de mediciones de MP de todos los especímenes que fueron sometidos a un número de ciclos masticatorios t_i .

La estrategia empleada en este trabajo hizo uso de una red neuronal artificial (ANN) para identificación de patrones (B.D. Ripley, 1996; Haykin, 1998; Wang et al., 2016; Zhang et al., 2016). Las ANN son modelos matemáticos de neuronas biológicas, donde las señales eléctricas son representadas por valores numéricos. Las ANN imitan algunas de las propiedades de un sistema nervioso biológico, especialmente su capacidad de aprender; en este caso, la capacidad de adquirir habilidades para procesar información que sigue ciertos patrones (Suzuki, 2013). En este caso, el propósito era crear una ANN con capacidad de inferir el número de ciclos masticatorios aplicados sobre una muestra de alimento de prueba.

La arquitectura escogida para la ANN fue el perceptrón multicapa (MLP) (Rumelhart, Hinton, y Williams, 1986). Los MLP mapean un set de entradas a un set de salidas deseadas a través de múltiples capas de nodos; donde cada nodo es una neurona artificial. La estructura básica de un MLP consiste en una capa de entrada, una capa de salida, y un número finito de capas ocultas (Callejón, Casado, Fernández, y Peláez, 2013; Čeppek, Šnorek, y Chudáček, 2008; G. Vaccaro y Pelaez, 2014; Veredas et al., 2010).

En este estudio la estructura de MLP consistió en k nodos en la capa de entrada, donde k es el número de descriptores de mezcla relevantes determinados previamente (ver Cap. II, Sec. 3.5), de 1 nodo binario (verdadero o falso) en la capa

de salida, y de un número variable h de nodos en la capa oculta; donde $k/3 \leq h \leq k$. Se construyó un set de MLPs para cada S_i con la tarea de determinar si un espécimen ha sido masticado durante un número de ciclos masticatorios t_i . El mejor número de neuronas h en la capa oculta se computó al incrementar secuencialmente el valor de h , desde $k/3$ hasta k , y ejecutando 10 entrenamientos por cada valor de h .

Las entradas y las salidas se obtuvieron al separar la información S de cada muestra en dos partes: se consideró al MP como la entrada del sistema y a t como la salida. El dataset del Gv fue dividido en tres subsets automáticamente para cada ejecución de entrenamiento: 40% para el subset de entrenamiento, 30% para el subset de validación, y 30% para el subset de pruebas. Cada MLP fue entrenada usando el subset de entrenamiento y se empleó el subset de validación para evitar el sobre-entrenamiento.

Por cada ejecución de entrenamiento, el sistema fue entrenado con las entradas de MP del grupo de entrenamiento y se comparó las salidas inferidas contra el número conocido de ciclos masticatorios. Luego, se computó el coeficiente de correlación de Matthews (MCC) para evaluar el rendimiento de la MLP entrenada (Matthews, 1975). El MCC es una medida de la calidad de la clasificación binaria, y se puede interpretar como el coeficiente de correlación entre los valores observados y los valores inferidos, donde una $MCC = 1$ representa una inferencia perfecta, $MCC = 0$ representa una equivalencia completamente aleatoria, y un $MCC = -1$ representa un completo desacuerdo entre la inferencia y la observación. El MCC fue computado como sigue:

$$MCC = \frac{TP \times TN - FP \times FN}{\sqrt{(TP + FP) \times (TP + FN) \times (TN + FP) \times (TN + FN)}} \quad \text{Eq. 19}$$

donde TP representa el número de verdaderos positivos, TN representa el número de verdaderos negativos, FP representa el número de falsos positivos, y FN representa el número de falsos negativos.

Se consideró a una MLP como válida cuando su MCC superaba el 0,95. Se seleccionó la MLP con el valor de MCC más alto. La fase de entrenamiento y calibración se consideraría como no satisfactoria en el caso que ninguna MLP superase el umbral de $MCC > 0,95$ después de iterar en todos los posibles valores de

h. Finalmente, se el sistema ensambló un set de MLPs válidas para cada ti posible como un clasificador único en la forma de una cascada binaria.

3.8. Codificación de clasificadores entrenados

La información obtenida de los procedimientos de calibración y entrenamiento fue codificada en una estructura estandarizada de representación desarrollada exclusivamente para este estudio, denominada MEPAT (Masticatory Performance and Assessment Technique). Una MEPAT contiene la información necesaria para reproducir un procedimiento de análisis de imágenes digitalizadas de gomas de mascar bicolor sometidas a la masticación. Las MEPAT son independientes del software utilizado, y se pueden almacenar y transferir con facilidad. Matemáticamente, una MEPAT consiste en una tupla:

$$\text{MEPAT} = \langle TF, ES, CH, CLS, OP, PER \rangle \quad \text{Eq. 20}$$

donde TF representa la información acerca del alimento de prueba, ES representa el procedimiento de recolección de muestra, CH representa el set de descriptores relevantes del rendimiento masticatorio, CLS representa el clasificador MLP entrenado, OP representa la información acerca del operador/operadores que ejecutaron la calibración, y PER consiste en la calificación de rendimiento del sistema de clasificación por MLP. El objetivo de la introducción de las MEPAT es proveer de los medios necesarios para facilitar la reproducción de los tests de Rendimiento y Eficiencia masticatorias realizados con el procedimiento propuesto en este trabajo. La estructura de persistencia de MEPAT empleada en este estudio, en forma de una esquema XML, se muestra en el Anexo 1.

3.9. Cuantificación del rendimiento y eficiencia masticatoria

La evaluación del MP y del ME con el sistema calibrado y entrenado se realizó sobre las muestras del grupo de diagnóstico G_d . El MP se computó empleando los descriptores que obtuvieron las más altas calificaciones de relevancia según la Eq. 15. Luego, el ME de cada muestra se computó empleando la Eq. 5, considerando $T = 20$. Por ejemplo, si el sistema entrenado infiere un valor de $P = 15$, entonces le

corresponde un ME de 15/20, es decir, del 75%. Una representación gráfica de la relación entre P y T se muestra en la Figura 8.

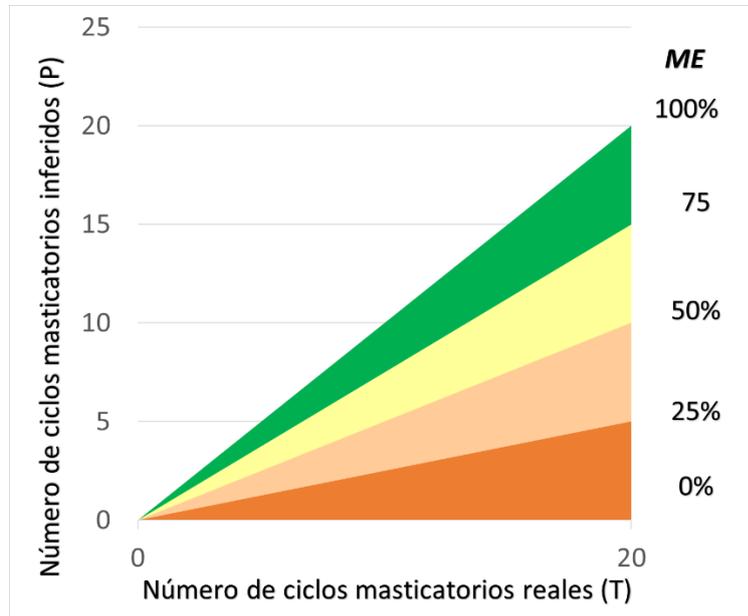


Figura 8 Representación gráfica de la relación entre el número de ciclos masticatorios reales versus el número de ciclos masticatorios inferidos en el cálculo de la Eficiencia Masticatoria.

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico se realizó en MATLAB 2015a (The MathWorks Inc. MA, USA) empleando el paquete Statistic Toolbox. Por cada uno de los descriptores de características de la imagen empleados, se evaluó la normalidad de las mediciones empleando la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Luego, la capacidad de diferenciar entre ciclos masticatorios se evaluó con ANOVA, considerando al número de ciclos masticatorios como factor fijo, corregido con la prueba pos hoc Bonferroni. Al mismo tiempo, se evaluó la correlación monótonica de los descriptores contra el número de ciclos masticatorios empleando el Rho de Spearman. Finalmente, por cada descriptor de características empleado, se empleó el indicador de relevancia q (ver Cap. III, Sec. 3.5) para verificar si el procedimiento de análisis de imagen para extracción de características es capaz de discriminar entre diferentes números de ciclos masticatorios aplicados sobre una muestra de goma de mascar bicolor.

El procedimiento de identificación de patrones sobre el G_v fue evaluado empleando el MCC; se consideró que un clasificador calibrado y entrenado con un MCC global superior al 0,95 como capaz de reconocer el número de ciclos masticatorios aplicados sobre especímenes de goma de mascar bicolor para una población de referencia. Las diferencias entre las métricas de rendimiento MCC de los entrenamientos realizados directamente con los valores obtenidos de los métodos de análisis de imágenes relevantes contra los entrenamientos realizados con los valores obtenidos luego de aplicar un procedimiento de reducción dimensional con PCA fueron comparadas empleando la prueba t de Student, previa verificación de la normalidad de las distribuciones empleando la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

El consenso inter-observador de pruebas sucesivas del ME para el G_d se verificó empleando el estadístico Kappa de Cohen (Cohen, 1960), considerando separadamente las citas iniciales y finales. Las diferencias entre el ME en pacientes edéntulos antes y después del tratamiento con prótesis totales se evaluó empleando la prueba de rangos con signo de Wilcoxon.

El nivel de significación estadística par este estudio fue del 95%.

IV. RESULTADOS

1. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES

En este estudio se recolectaron un total de 2560 muestras de gomas de mascar bicolores sometidas a la masticación. Se recolectaron 2000 muestras del grupo de referencia para la calibración G_r , 400 muestras del grupo de validación de entrenamiento del sistema G_v , y 160 muestras del grupo de diagnóstico G_d . De estas muestras se obtuvo un total de 5120 imágenes digitales.

1.1. Tiempo de ejecución

El procedimiento de calibración y entrenamiento del sistema de clasificación se completó en 156 horas, repartidas en 9 sesiones de recolección de muestras (4 horas por sesión, con 4 operadores), y una sesión de procesamiento de imágenes que tomó 3,86 horas. El procesamiento de las imágenes se realizó en un ordenador Intel Core i7-5930K con 32GB de RAM. En la Tabla 3 se detalla la información acerca de los tiempos requeridos para la ejecución de la calibración y entrenamiento del sistema de clasificación.

Tabla 3 Detalle del tiempo de ejecución del procedimiento de calibración y entrenamiento del sistema de clasificación

	Tiempo de ejecución		Porcentaje del tiempo
	Por muestra (segundos)	Total (horas)	
Obtención de la muestra	90.6	100.7	64.5%
Digitalización	52.9	51.5	33.0%
Procesamiento de las imágenes	3.5	3.9	2.5%
Total	178.6	156.1	100.0%

1.2. Indicadores de mezcla relevantes

El test de Kolmogorov-Smirnov confirmó la normalidad de la distribución de mediciones por número de ciclos masticatorios para todos los 121 métodos de análisis de imágenes ($p < 0,05$). Luego, el análisis de ANOVA con corrección de Bonferroni confirmó que 116 de los 121 métodos de análisis de imágenes probados son capaces de discriminar entre al menos dos números de ciclos masticatorios diferentes. Por otra parte, el análisis de correlación por rangos de Spearman confirmó que 35 de los

121 métodos de análisis de imágenes probados presentaban una correlación moderada a alta con el número de ciclos masticatorios $|\rho| > 0.5$; $p < 0.05$. Finalmente, se confirmó que estos últimos 35 métodos obtuvieron una calificación de relevancia q mayor que 0.5, por lo que pueden ser considerados como válidos y relevantes, con capacidad de discriminar entre diferentes números de ciclos masticatorios aplicados sobre una goma de mascar bicolor. Una representación gráfica del número de pares de ciclos masticatorios que cada método de análisis de imágenes fue capaz de diferenciar y de la correlación de sus mediciones con el número de ciclos masticatorios de muestra en el la Figura 9. El coeficiente de correlación ρ , el número de pares de ciclos masticatorios diferenciables γ y la calificación de relevancia q para los 35 métodos de análisis de imágenes considerados como válidos y relevantes se detallan en la **Tabla 4**.

Tabla 4 Resultados del análisis de relevancia para los métodos de análisis de imágenes demostraron capacidad de discriminar entre diferentes números de ciclos masticatorios.

Método de análisis de imágenes	Coefficiente de correlación ρ	Número de pares de ciclos masticatorios diferenciables γ	Calificación de relevancia q
VhH	0.791	23	0.806
EhH	0.788	23	0.804
Viu	0.742	24	0.799
ViS	0.729	24	0.793
ViGn	0.704	23	0.763
ViRn	0.692	24	0.774
ViG	0.692	24	0.774
ViB	0.682	25	0.787
VL	-0.638	25	0.765
VRn	-0.638	26	0.783
NhI	0.634	17	0.621
Vu	-0.634	26	0.781
VhI	0.630	15	0.583
VB	-0.630	25	0.761
VG	-0.626	26	0.777
VS	-0.626	25	0.759
NhR	0.624	18	0.633
VihL	0.618	22	0.702
VhR	0.617	17	0.612
VGn	-0.614	26	0.771
NhG	0.607	17	0.607
NhB	0.587	16	0.579
NhL	0.586	17	0.596

VhG	0.581	16	0.576
ShH	0.572	26	0.750
ViBn	0.566	22	0.676
NhS	0.565	16	0.568
VhB	0.555	18	0.599
VhL	0.546	16	0.559
NhGn	0.545	16	0.558
VBn	-0.545	21	0.647
Nhu	0.538	19	0.608
NhRn	0.533	16	0.552
MH	0.523	23	0.672
VhS	0.517	18	0.580

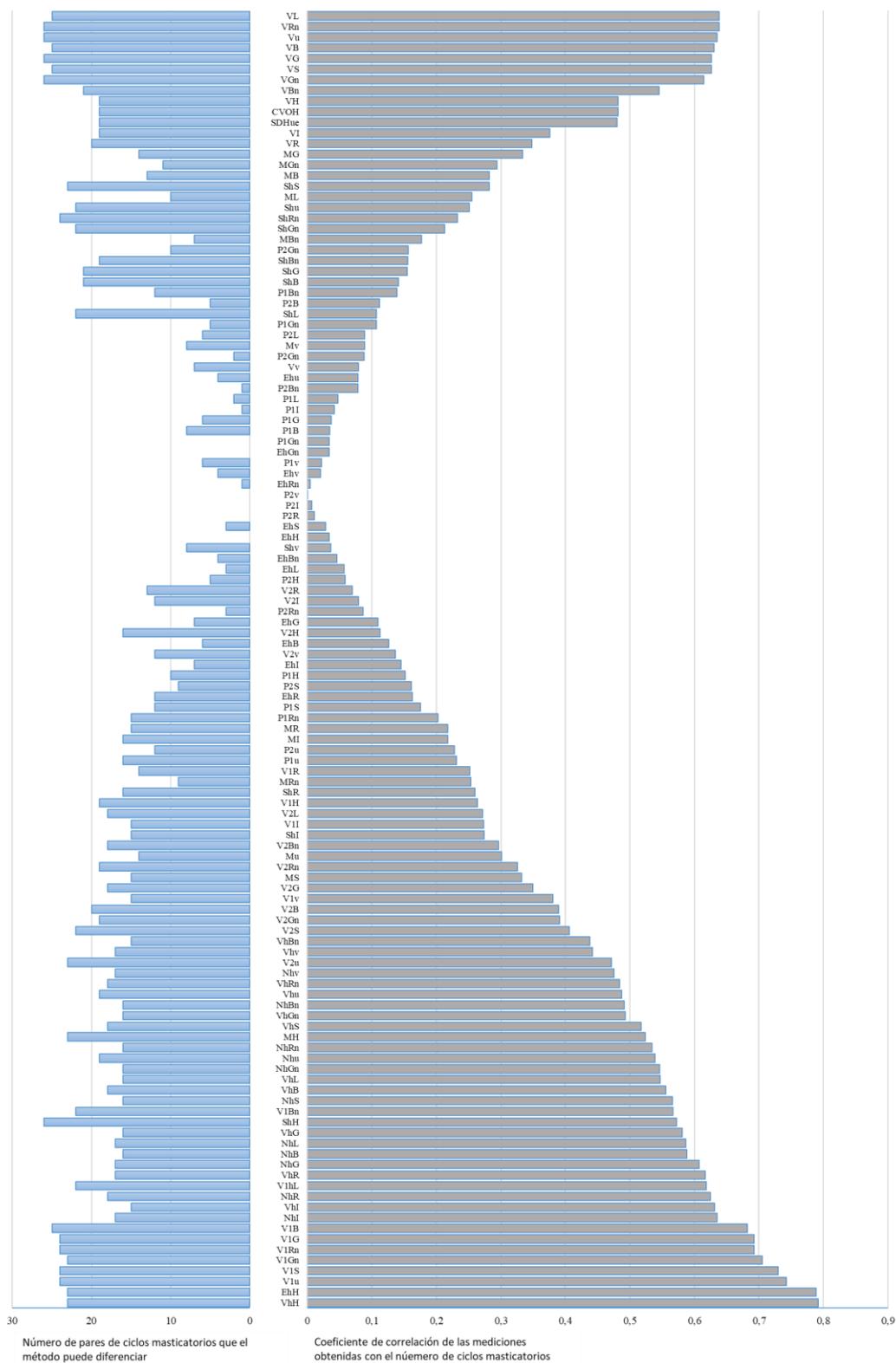


Figura 9 Representación gráfica de la capacidad de diferenciar entre pares de ciclos masticatorios y la correlación monótonica con el número de ciclos masticatorios de las mediciones obtenidas por cada uno de los métodos de análisis de imágenes empleados en el estudio.

El método de análisis de imágenes que comprende el cómputo de la varianza del histograma del tono (VhH) obtuvo la calificación de relevancia q más alta con $q = 0,806$, un coeficiente de correlación con el número de ciclos masticatorios de $\rho = 0.792$, y capacidad de discriminar entre $\gamma = 23$ pares de ciclos masticatorios diferentes. Por otra parte, el método de la varianza circular del tono (CVOH), el cual es ampliamente utilizado en otros estudios como indicador del MP, mostró una baja correlación con el número de ciclos masticatorios $\rho = 0,482$ ($p < 0,05$).

El análisis de componentes principales ejecutado sobre el set de 35 métodos de análisis de imágenes relevantes indicó la existencia de 3 componentes principales (PC1, PC2 y PC3), los cuales explicaron el 91,301%, 4,488%, y 4,211% de la varianza respectivamente. La Tabla 5 muestra los factores los componentes principales rotados con el método *Promax* con relación a los métodos de análisis de imágenes probados.

Tabla 5 Resultados del análisis de componentes principales aplicado sobre las mediciones obtenidas de los métodos de análisis de imágenes considerados como relevantes para la cuantificación de la mezcla.

Método de análisis de imágenes	PC1	PC2	PC3
VhH	0.99	-0.02	-0.04
EhH	0.01	0.00	0.00
Viu	0.00	0.35	0.00
ViS	0.00	0.00	0.08
ViGn	0.00	0.00	0.00
ViRn	0.00	0.00	0.00
ViG	0.00	0.00	0.00
ViB	0.00	0.00	0.00
VL	0.11	0.01	0.19
VRn	0.00	0.00	0.00
NhI	0.70	0.26	0.10
Vu	0.00	0.00	0.00
VhI	0.00	0.00	0.00
VB	0.01	-0.05	0.25
VG	0.01	-0.06	0.27
VS	0.00	-0.01	0.28
NhR	0.00	0.00	0.00
VihL	0.00	0.00	0.00
VhR	0.00	0.00	0.00
VGn	-0.01	-0.05	0.61

NhG	0.00	0.00	0.00
NhB	0.51	0.00	0.00
NhL	-0.02	-0.03	0.41
VhG	-0.02	-0.08	0.40
ShH	-0.03	-0.05	0.46
V1Bn	0.00	0.00	0.00
NhS	0.00	0.00	0.00
VhB	0.00	0.00	0.00
VhL	-0.03	0.23	0.32
NhGn	0.00	0.00	0.00
VBn	0.00	0.00	0.00
Nhu	-0.02	0.93	-0.10
NhRn	0.00	0.00	0.00
MH	0.00	0.01	0.00
VhS	0.00	0.00	0.74

1.3. Modelos de clasificación

Los clasificadores MLP entrenados directamente con los 35 descriptores seleccionados como relevantes obtuvieron mejores resultados que aquellos entrenados solamente con los tres componentes principales, luego de ejecutar 200 iteraciones, aunque la prueba t de Student no encontró diferencias estadísticamente significativas entre ambos casos ($p = 0,412$). El clasificador MLP que mostró las mejores métricas de rendimiento fue entrenado utilizando los métodos de análisis de imágenes listados en la Tabla 4, con 16 neuronas en la capa oculta ($h = 16$), y se obtuvo después de 110 iteraciones. Los detalles de las métricas de rendimiento de esta MLP se muestran en la Tabla 6. Finalmente, los resultados individuales de métricas de rendimiento para clasificadores unitarios detallados por tipo de método de análisis de imágenes se presentan en la Tabla 7, donde se ha marcado con un asterisco (*) los clasificadores unitarios con un rendimiento superior a 0,5 ($MCC > 0,5$).

Tabla 6 Métricas de rendimiento del mejor clasificador obtenido

Métrica de rendimiento	Valor
Sensibilidad	0,98
Especificidad	0,99
Precisión	0,99
MCC	0,97

Tabla 7 Resultados individuales de métricas de rendimiento para clasificadores unitarios por tipo de método de análisis de imágenes.

Método de análisis de imágenes	Métrica de MCC por número de ciclos masticatorios (T)					
	T = 0	T = 5	T = 10	T = 15	T = 20	Global
MR	0,036	-0,127	-0,193	0,016	0,012	0,069
VR	0,088	0,143	0,129	0,138	0,091	0,114
P1R	-0,167	-0,107	-0,161	-0,018	0,060	-0,080
P2R	0,0365	0,082	0,030	-0,119	0,056	0,057
V1R	-0,002	-0,165	-0,075	-0,211	0,452	0,081
V2R	-0,002	-0,101	0,129	0,129	-0,193	0,062
VhR	0,170	-0,246	-0,154	-0,260	0,454	0,238
ShR	0,170	0,091	0,167	0,084	0,084	0,113
EhR	0,060	-0,036	-0,020	0,055	0,256	0,057
NhR	0,170	0,212	-0,154	-0,276	0,442	0,232
MG	-0,049	0,382	0,528*	-0,004	0,321	0,107
VG	-0,070	-0,006	0,133	-0,107	-0,030	0,045
P1G	-0,070	-0,147	-0,054	0,091	0,256	0,105
P2G	-0,070	-0,070	0,016	-0,154	-0,139	0,070
V1G	-0,087	-0,127	0,288	0,133	-0,292	0,166
V2G	0,088	-0,006	0,062	-0,132	-0,324	-0,067
VhG	0,123	0,196	-0,211	-0,020	0,256	0,121
ShG	0,123	0,264	0,016	-0,020	-0,020	0,040
EhG	0,348	-0,008	0,115	-0,004	0,257	0,053
NhG	0,248	0,140	-0,193	-0,228	0,528*	0,241
MB	-0,070	0,382	0,357	-0,077	0,133	0,158
VB	0,241	0,142	0,233	-0,077	-0,030	0,113
P1B	0,060	-0,062	-0,051	0,138	0,149	0,083
P2B	-0,002	-0,125	0,062	-0,020	-0,077	0,032
V1B	0,123	0,206	0,188	0,186	0,357	0,199
V2B	-0,127	-0,107	0,452	-0,154	-0,260	-0,190
VhB	0,123	0,016	-0,004	-0,174	0,518*	0,060
ShB	-0,070	0,311	-0,020	0,321	-0,020	0,078
EhB	0,292	-0,075	0,167	0,091	0,375	0,166
NhB	0,248	0,115	-0,193	-0,228	0,596*	0,237
ML	0,123	0,382	0,528*	-0,077	0,091	0,177
VL	0,241	-0,036	0,016	-0,132	-0,004	0,038
P1L	0,348	-0,062	0,288	-0,174	-0,154	0,175
P2L	0,015	-0,054	0,138	-0,020	-0,119	0,049
V1L	-0,070	-0,036	0,000	-0,075	-0,228	-0,001
V2L	0,348	-0,183	0,133	0,016	-0,211	0,123

VhL	0,182	0,016	-0,145	-0,051	0,256	0,089
ShL	0,123	0,075	-0,051	-0,132	0,055	0,080
EhL	0,292	0,032	0,149	-0,054	0,366	0,123
NhL	0,248	0,167	-0,193	-0,244	0,528*	0,253
Mu	0,088	0,206	0,129	-0,004	0,288	0,079
Vu	0,123	0,142	0,321	-0,193	0,055	0,143
P1u	0,155	0,029	-0,054	-0,119	-0,145	0,084
P2u	0,060	0,140	-0,211	0,023	-0,004	0,045
V1u	0,060	0,140	-0,154	-0,211	-0,077	-0,116
V2u	-0,070	-0,107	0,023	-0,020	0,062	-0,047
Vhu	-0,049	0,068	0,084	-0,211	0,233	0,107
Shu	0,060	0,228	0,091	0,055	0,211	0,107
Ehu	-0,115	-0,183	-0,028	0,016	0,596*	0,089
Nhu	0,292	0,167	-0,051	-0,244	0,660*	0,209
Mv	-0,020	-0,054	-0,030	-0,174	0,233	0,067
Vv	0,182	-0,062	0,000	-0,154	0,149	0,001
P1v	-0,102	-0,107	0,133	-0,051	0,084	0,091
P2v	0,248	0,016	0,055	-0,203	-0,228	0,101
V1v	0,170	0,075	0,016	0,016	-0,174	0,056
V2v	0,170	0,110	-0,154	-0,107	-0,154	-0,137
Vhv	0,182	-0,199	-0,020	-0,124	0,186	0,111
Shv	0,248	0,142	0,084	-0,051	-0,102	0,109
Ehv	0,170	0,044	-0,020	-0,098	0,355	-0,088
Nhv	0,170	0,212	-0,051	-0,244	0,528*	0,188
MH	0,000	0,471	0,257	0,133	0,357	0,001
VH	0,241	-0,199	0,257	0,091	0,375	0,211
P1H	0,000	0,153	0,186	0,000	0,000	0,000
P2H	-0,070	0,212	-0,102	-0,107	0,587*	0,157
V1H	0,388	-0,125	0,091	0,133	0,528*	0,199
V2H	0,170	-0,165	-0,020	0,186	-0,124	0,105
VhH	0,241	0,174	-0,132	-0,193	0,442	-0,216
ShH	0,348	-0,146	-0,124	0,133	0,016	0,106
EhH	0,000	0,277	0,129	0,257	0,528*	0,321
NhH	0,241	0,257	0,000	-0,211	0,442	0,121
MS	-0,049	0,206	0,452	-0,004	0,188	0,083
VS	-0,087	0,153	0,257	0,023	0,055	0,085
P1S	0,088	0,110	0,062	-0,216	-0,257	-0,127
P2S	0,248	0,056	0,091	-0,203	0,188	0,137
V1S	-0,087	-0,008	0,215	-0,119	-0,174	-0,081
V2S	-0,036	-0,215	0,115	0,321	-0,193	0,141
VhS	0,088	0,174	0,115	-0,004	0,366	0,078
ShS	-0,070	0,350	-0,051	0,321	-0,145	0,142
EhS	-0,127	0,056	0,005	0,023	0,452	0,054

NhS	0,292	0,264	-0,154	-0,228	0,528*	0,270
MI	0,292	-0,107	0,149	0,016	0,200	0,108
VI	-0,002	0,075	-0,102	0,055	0,062	0,038
P1I	-0,092	-0,008	-0,339	0,320	-0,098	0,097
P2I	0,155	-0,062	-0,102	-0,211	0,016	0,080
V1I	-0,036	-0,125	-0,077	-0,132	0,275	-0,105
V2I	-0,070	-0,125	0,257	0,129	-0,107	0,125
VhI	0,123	-0,036	-0,154	-0,244	0,186	-0,125
ShI	0,574*	0,016	0,321	0,133	0,062	0,120
EhI	-0,087	-0,036	-0,051	-0,004	0,366	-0,048
NhI	0,241	0,174	-0,174	-0,228	0,528*	0,245
MRn	0,123	0,382	0,186	-0,102	0,186	0,175
VRn	0,088	0,206	0,275	-0,051	0,149	0,130
P1Rn	-0,020	-0,006	-0,030	-0,020	0,084	0,022
P2Rn	-0,105	0,115	0,245	0,051	-0,197	0,124
V1Rn	-0,087	0,350	-0,075	0,257	-0,054	0,126
V2Rn	0,170	-0,101	0,200	-0,124	0,023	0,100
VhRn	0,170	0,140	-0,184	-0,030	0,357	0,136
ShRn	-0,049	0,029	0,133	-0,102	-0,107	0,073
EhRn	-0,049	-0,165	-0,077	-0,020	0,235	0,078
NhRn	0,348	0,228	-0,174	-0,228	0,528*	0,278
MGn	0,241	0,206	0,366	-0,102	0,357	0,231
VGn	0,088	0,075	0,129	0,257	0,055	0,104
P1Gn	0,036	-0,107	-0,004	0,188	-0,030	0,039
P2Gn	-0,020	0,142	-0,102	0,288	0,375	0,126
V1Gn	-0,002	-0,085	0,062	0,235	-0,154	0,056
V2Gn	0,000	0,304	0,129	-0,193	-0,051	0,07
VhGn	0,123	0,194	-0,174	-0,102	0,587*	-0,190
ShGn	-0,049	0,140	0,257	-0,077	-0,051	0,093
EhGn	0,123	-0,165	0,215	0,257	0,587*	0,231
NhGn	0,123	0,115	-0,174	-0,228	0,596*	0,202
MBn	0,241	0,312	0,133	-0,124	0,133	0,175
VBn	0,182	0,434	0,233	0,091	0,167	0,195
P1Bn	0,060	0,142	0,288	0,016	-0,228	0,098
P2Bn	-0,102	0,270	0,133	-0,020	-0,054	0,083
V1Bn	-0,127	-0,006	0,366	0,133	0,091	0,080
V2Bn	-0,127	-0,125	0,055	-0,193	-0,211	0,129
VhBn	0,088	0,196	-0,211	-0,077	0,257	0,149
ShBn	0,348	0,142	0,235	-0,165	-0,107	0,183
EnBn	-0,087	-0,127	0,091	-0,054	0,062	0,080
NhBn	0,123	0,082	-0,193	-0,211	0,452	0,179
CVOH	0,241	0,257	0,000	-0,211	0,442	0,188

2. DIAGNÓSTICO DEL RENDIMIENTO Y EFICIENCIA MASTICATORIAS

La fase de diagnóstico requirió un total de 6,23 horas, las cuales correspondieron con dos sesiones de recuperación de muestras de alrededor 2,6 horas por sesión con 4 operadores, y dos sesiones de análisis de imágenes empleando el sistema previamente calibrado, que tomó alrededor de 12 minutos para procesar todo el set de muestras. El estadístico de Kappa de Cohen mostró que las mediciones repetidas de ME para el grupo G_d mostraron un acuerdo casi perfecto, con $\kappa \geq 0,95$. La prueba de Wilcoxon mostró que existe un incremento significativo en el ME de pacientes adultos mayores edéntulos posterior al tratamiento con prótesis totales, con $Z = -2.31$, $p < 0.01$. El MP se computó empleando al VhH como indicador de la mezcla, ya que este obtuvo la mejor calificación de relevancia. La media, mediana, moda y desviación estándar del ME y MP para el grupo G_d se detallan en la Tabla XXX.

Tabla 8 Estadísticos descriptivos de los resultados de la medición de ME y MP empleando el sistema calibrado

	Estadístico	ME	Equivalencia	MP
Antes del tratamiento	Media	0,26	Impedida	$10,26 \times 10^6$
	Mediana	0,25	Impedida	$9,56 \times 10^6$
	Desv. Est.	0,22	-	1897,01
	Moda	0,50	Limitada	$10,11 \times 10^6$
Después del tratamiento	Mean	0,71	Adecuada	$24,05 \times 10^6$
	Median	0,75	Adecuada	$23,49 \times 10^6$
	Desv. Est.	0,23	-	3314,78
	Moda	0,75	Adecuada	$23,99 \times 10^6$

V. DISCUSIONES Y CONCLUSIÓN

1. DISCUSIONES

En este trabajo se ha introducido nuevas definiciones para el MP y el ME, las cuales expanden las definiciones anteriores de manera que sean retro-compatibles, y permiten una clara diferenciación de conceptos. Además, se ha presentado un modelo para diagnosticar el ME basado que hace uso de un sistema de inteligencia computacional para identificación de patrones.

La fase de calibración del sistema consumió la mayor parte del tiempo experimental, ya que involucró la ejecución de procedimientos de análisis de imágenes complejos, y el entrenamiento supervisado de clasificadores por redes neuronales artificiales. Por otra parte, una vez calibrado el sistema el diagnóstico del ME y MP de los pacientes en el grupo de diagnóstico G_v fue considerablemente corto, de alrededor de 5 minutos por paciente, lo cual puede considerarse lo suficientemente rápido para ejecutarse en el contexto de la clínica odontológica tradicional. La diferencia de esfuerzo necesario para calibrar el sistema versus el necesario para realizar un diagnóstico con el sistema calibrado era predecible, ya que la fase de calibración requirió de más muestras y de procedimientos computacionales más complejos.

Los métodos de análisis de imágenes probados en este estudio como descriptores de características de la mezcla de gomas de mascar bicolor son deterministas y completamente automáticos. Esto implica que la utilización de cualquiera de ellos como indicador del MP resultaría en exactamente los mismos valores al ser aplicado múltiples veces sobre la misma muestra, sin influencia del operador, del software o del ordenador en el que se realicen los análisis. Es importante destacar que estos métodos de análisis de imágenes no fueron diseñados originalmente para ser empleados como indicadores del MP, sino que son usados ampliamente en aplicaciones de visión por computador (Nixon, 2008).

Los resultados sugieren que 35 de los 121 métodos de análisis de imágenes probados son capaces de discriminar entre diferentes números de ciclos masticatorios cuando se emplean para cuantificar la mezcla de gomas de mascar bicolor sometidas a la masticación, con $q > 0,5$ y $p < 0,05$ en todos los casos, por lo que se rechaza la primera hipótesis nula de este estudio. Esto implica que el grado

de mezcla de gomas de mascar bicolores se puede evaluar por más de un único método de análisis de imágenes, y que algunos de estos métodos son mejores que otros caracterizando la mezcla dadas las propiedades estructurales y de color del alimento de prueba. Estos resultados favorecen la utilización de la nueva definición del MP introducida en este estudio, que contempla la utilización de múltiples descriptores de mezcla al mismo tiempo como indicadores del MP.

La varianza del histograma del tono o VhH obtuvo las calificaciones de relevancia más altas, por lo que puede considerarse como el indicador óptimo del MP según la definición tradicional que contempla un único método de cuantificación de la mezcla. Por otra parte, el análisis de componentes principales determinó que 3 componentes podrían describir el 99,99% de la varianza, lo que sugiere que la mayoría de los métodos de análisis de imágenes valorados como relevantes en la fase de calibración realmente no proveen de información nueva, sino que pueden considerarse como combinaciones lineales unos de otros. Estos resultados eran esperados, ya que matemáticamente las imágenes a color pueden describirse en 3 canales (ej. RGB, HSI, LUV, XYZ, etc.), por lo que normalmente se recomienda la aplicación de técnicas de reducción dimensional cuando se emplea una gran cantidad de descriptores, como es el caso de este estudio.

El modelo de clasificación basado en una cascada binaria de MLP alcanzó un rendimiento alto, obteniendo el clasificador entrenado con mayor rendimiento un MCC de 0,97. Esto implica que un modelo de clasificación basado en técnicas de inteligencia computacional para el reconocimiento de patrones es capaz de inferir de manera correcta el número de ciclos masticatorios que han sido aplicados sobre especímenes de gomas de mascar bicolor en una población de referencia; por lo que se rechaza la segunda hipótesis nula de este estudio. Por otra parte, los resultados de la Tabla 7 sugieren que los clasificadores unitarios construidos directamente a partir de un solo método de análisis de imágenes presentan resultados muy inferiores al modelo de clasificación basado en inteligencia computacional. Sin embargo, varios clasificadores unitarios obtuvieron buenos resultados de clasificación para $T = 20$ ciclos masticatorios, con MCC superior a 0,5; lo que sugiere que el bolo de alimento de prueba sometido a 20 ciclos masticatorios puede ser fácilmente analizado por varios métodos de análisis de imágenes.

El ME de los sujetos en el grupo de diagnóstico G_v fue significativamente menor que los del grupo de referencia, con $p < 0.05$, siendo la media de eficiencia masticatoria para este grupo de $ME = 26\%$, versus $ME = 100\%$ para el grupo de referencia G_r . Estos resultados sugieren que el modelo de clasificación propuesto en este trabajo es capaz de diferenciar los entre niveles de mezcla alcanzados por individuos edéntulos y los de la población de referencia; por lo que se rechaza la tercera hipótesis nula.

Los resultados de este estudio sugieren que el ME de individuos edéntulos fue significativamente más alto después de recibir tratamiento con prótesis totales, con $p < 0,01$; registrándose un incremento del ME medio del 26% al 71%; por lo que se rechaza la cuarta hipótesis nula. Consecuentemente, es posible considerar que el modelo de clasificación basado en técnicas de inteligencia computacional para el reconocimiento de patrones es capaz de identificar las diferencias en la eficiencia masticatoria de pacientes edéntulos sometidos a tratamientos restauradores.

El modelo propuesto puede ser mejorado en trabajos futuros, principalmente mediante la incorporación de procedimientos de análisis de imágenes más sofisticados; dado que uno de los factores claves del cómputo del ME a través de reconocimiento de patrones es la calidad de los indicadores del MP, y de la cantidad de información relevante que estos indicadores aportan al modelo. Por lo tanto, la introducción de procedimientos más sofisticados para la cuantificación de la mezcla como el análisis de texturas o la transformación de wavelet podrían mejorar significativamente el rendimiento del modelo propuesto en este estudio.

Es posible que alcanzar una estandarización a escala global de los indicadores para el MP no sea viable, ya que existen grandes diferencias entre los alimentos de prueba disponibles en distintos países o regiones. Por otra parte, las diferencias entre equipos de digitalización pueden producir efectos indeseables en los resultados de la clasificación; aunque este fenómeno no haya sido estudiado a profundidad, y el modelo propuesto puede ser fácilmente recalibrado para adaptarse a varios tipos de equipos de digitalización.

Asimismo, la selección del alimento de prueba correcto fue una tarea crucial, ya que influencia directamente los resultados de la evaluación del ME y MP. En este

contexto, se sugiere que las gomas de mascar bicolores empleadas como alimentos de prueba para los tests de evaluación del rendimiento masticatorio basados en el análisis de mezcla cumplan con: (1) poseer dos colores diferenciables que se mezclen producto de la masticación, (2) no contener azúcar, (3) ser fáciles de masticar, (4) no tener recubrimiento duro, y (5) no adherirse a las dentaduras artificiales. Aún con estas restricciones, se considera posible encontrar especímenes adecuados para realizar el tests donde se comercialicen gomas de mascar fabricadas por las compañías Lotte®, Wrigley® o Mars®.

Por otra parte, este estudio consideró solo una combinación de colores de gomas de mascar bicolor pertenecientes a una sola marca comercial; por lo que se recomienda que estudios futuros hagan uso de otras combinaciones de colores y marcas disponibles en otras regiones y países. Adicionalmente, se recomienda extender este estudio para incluir una muestra mayor de individuos con capacidad masticatoria comprometida.

Es importante notar que el sistema propuesto involucró la utilización de algoritmos diseñados para reducir la influencia del operador sobre el proceso de análisis de imágenes; consecuentemente, el análisis repetido sobre las mismas imágenes digitales siempre proveerá exactamente los mismos resultados. Sin embargo, la identificación de patrones involucra un componente aleatorio, el cual es requerido para asegurar la robustez del clasificador por redes neuronales artificiales. Esto implica que las ejecuciones repetidas del paso de aprendizaje de máquina podrían proveer resultados diferentes cada vez. Por lo tanto, en este estudio se empleó una estrategia de validación del clasificador orientada a disminuir la aleatoriedad de la fase de calibración la requerir una alta calificación de MCC y emplear una estructura de cascada binaria de clasificación.

El modelo propuesto hace uso de procedimientos de análisis de imágenes sencillos, orientados a extraer características de los píxeles de la imagen y de sus histogramas; por lo que ciertas combinaciones de colores pueden llegar a afectar la calidad de los descriptores de características obtenidos. Este fenómeno ha sido descrito anteriormente por Halazonetis et al. (2013), donde se introdujo el indicador CVOH, y se indicó que este método en concreto no funcionaría correctamente con

gomas de mascar que contengan una lámina de color blanco (Halazonetis et al., 2013). Por lo tanto, la baja calificación de relevancia que obtuvo el CVOH en este estudio era previsible, ya que se empleó una combinación de colores rojo y blanco en las gomas de mascar utilizadas como alimento de prueba. Por este motivo, se refuerza la sugerencia de ampliar este estudio para incluir un mayor número de alimentos de prueba donde no se utilicen otras combinaciones de colores que sean favorables para métodos de cuantificación de la mezcla tales como el CVOH.

2. IMPLICACIONES CLÍNICAS

La evaluación objetiva del Rendimiento y Eficiencia Masticatorias ha estado limitada al ámbito de la investigación debido a las dificultades que plantean los métodos existentes en la literatura científica. Tomando en cuenta lo anterior, en este trabajo se ha presentado una nueva estrategia de evaluación objetiva del Rendimiento y Eficiencia Masticatorias que emplea alimentos de prueba de fácil obtención y manipulación, como son las gomas de mascar; y propone un método de análisis de imágenes completamente automatizado, que requiere un promedio de 6 minutos para su ejecución de principio a fin. Por lo tanto, se considera que el método propuesto es viable para su utilización en la clínica odontológica.

Por otra parte, la redefinición de la Eficiencia Masticatoria como una medida de proporción adimensional (0% al 100%) facilita la comprensión de los resultados del diagnóstico. Cabe destacar que el método propuesto en este trabajo es el único hasta el momento en emplear una escala independiente al procedimiento de análisis de imágenes empleado.

La evaluación del Rendimiento y Eficiencia Masticatorias aporta información útil sobre el beneficio que tienen los tratamientos odontológicos sobre el paciente; especialmente los tratamientos protésicos y restaurativos. Además, la evaluación objetiva de la masticación puede emplearse para cuantificar el impacto, positivo o negativo, que tienen ciertos tratamientos invasivos, tales como procedimientos quirúrgicos o tratamientos ortodónticos.

3. RECOMENDACIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS

Uno de los aspectos que debería ser explorado en futuras investigaciones es la influencia que tiene la afinidad del paciente hacia el alimento de prueba, i.e. gomas de mascar, sobre los resultados de las mediciones, ya que estudios previos sugieren que puede existir una relación entre ambos (Forde, van Kuijk, Thaler, de Graaf, y Martin, 2013).

Por otra parte, existen indicios de que las variaciones en el Rendimiento Masticatorio pueden indicar deterioros en el estado de salud de pacientes adultos mayores institucionalizados; por lo que se propone emplear la metodología propuesta en este estudio para realizar una monitorización a largo plazo del estado de salud de la masticación de adultos mayores institucionalizados en centros geriátricos.

Finalmente, se propone explorar la posibilidad de mejorar el procedimiento empleado en este estudio mediante la inclusión de técnicas de inteligencia computacional de aprendizaje profundo (Deep Learning), y el desarrollo de una plataforma web que facilite el acceso a esta solución diagnóstica por medio de dispositivos móviles.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el desarrollo de un nuevo sistema de evaluación de la Eficiencia y Rendimiento Masticatorio, basado en el reconocimiento automático de patrones de mezcal en gomas de mascar bicolores sometidas a la masticación, empleando técnicas de inteligencia computacional y de procesamiento de imágenes digitales.

Tomando en cuenta las limitaciones de este estudio, se concluye que:

- 1) Varios procedimientos de análisis de imágenes digitales usados tradicionalmente para tareas de visión por computador, basados en la extracción de características de los píxeles de la imagen y en el análisis de histogramas proveen mediciones indicativas de la mezcla de gomas de

mascar bicolor que están correlacionadas con el número de ciclos masticatorios aplicados sobre esta.

- 2) Estos procedimientos de análisis de imágenes son capaces de discriminar entre los niveles de mezcla provocados por diferentes números de ciclos masticatorios aplicados sobre una muestra de goma de mascar bicolor; por lo que pueden ser considerados como válidos para su utilización como indicadores del rendimiento masticatorio.
- 3) El modelo propuesto para la evaluación y clasificación del rendimiento y eficiencia masticatorias puede identificar correctamente los patrones de mezcla en gomas de mascar bicolor sometidas a diferentes números de ciclos masticatorios haciendo uso de una combinación de técnicas de análisis de imágenes e inteligencia computacional. Asimismo, se concluye que este sistema es capaz de inferir correctamente el número de ciclos masticatorios que un individuo de referencia necesitaría aplicar sobre una muestra de alimento de prueba para alcanzar el mismo nivel de mezcla; y de esta manera, permite calcular la Eficiencia Masticatoria como la proporción entre el número de ciclos masticatorios inferidos sobre el número de ciclos masticatorios reales.
- 4) El sistema propuesto tiene la capacidad de diferenciar entre los niveles de mezcla alcanzados por individuos edéntulos versus los niveles de mezcla que alcanza la población de referencia completamente dentada aplicando el mismo número de ciclos masticatorios. Finalmente, se concluye que el tratamiento con prótesis removibles totales en pacientes edéntulos produce un aumento significativo en el rendimiento y eficiencia masticatorias cuantificado mediante el sistema propuesto; y que el tiempo requerido para ejecutar el diagnóstico por individuo es inferior a 6 minutos, por lo que se sugiere su utilización dentro del contexto de la clínica odontológica diaria.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Austin, J. B. (1939). Methods of representing distribution of particle size. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 11(6), 334-339. doi:10.1021/ac50134a014
- B.D. Ripley. (1996). *Pattern Recognition and Neural Networks*. Oxford, UK.: Cambridge University Press.
- Bai, Xue, y Sapiro, Guillermo. (2007). Distancecut: Interactive Segmentation and Matting of Images and Videos. En *2007 IEEE International Conference on Image Processing* (Vol. 2, p. II-249-II-252). IEEE. doi:10.1109/ICIP.2007.4379139
- Bakke, Merete, Larsen, Stine L., Lautrup, Caroline, y Karlsborg, Merete. (2011). Orofacial function and oral health in patients with Parkinson's disease. *European Journal of Oral Sciences*, 119(1), 27-32. doi:10.1111/j.1600-0722.2010.00802.x
- Bates, JF, Stafford, GD, y Harrison, A. (1976). Masticatory function - a review of the literature. III. Masticatory performance and efficiency. *Journal of Oral Rehabilitation*, 3(1), 57-67. Recuperado de: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2842.1976.tb00929.x/full>
- Bergdahl, Maud, Habib, Reza, Bergdahl, Jan, Nyberg, Lars, y Nilsson, Lars Göran. (2007). Natural teeth and cognitive function in humans. *Scandinavian Journal of Psychology*, 48(6), 557-565. doi:10.1111/j.1467-9450.2007.00610.x
- Bron, Esther E., Smits, Marion, van der Flier, Wiesje M., Vrenken, Hugo, Barkhof, Frederik, Scheltens, Philip, ... Klein, Stefan. (2015). Standardized evaluation of algorithms for computer-aided diagnosis of dementia based on structural MRI: the CADDementia challenge. *NeuroImage*, 111, 562-79. doi:10.1016/j.neuroimage.2015.01.048
- Callejón, A. M., Casado, A. M., Fernández, M. A., y Peláez, J. I. (2013). A System of Insolvency Prediction for industrial companies using a financial alternative model with neural networks. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 6(1), 29-37. doi:10.1080/18756891.2013.754167
- Čepeck, Miroslav, Šnorek, Miroslav, y Chudáček, Václav. (2008). Ecg signal classification using game neural network and its comparison to other

- classifiers. En *Artificial Neural Networks-ICANN 2008* (pp. 768-777). Springer.
- Cohen, Jacob. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37-46. doi:10.1177/001316446002000104
- Comaniciu, D., y Meer, P. (2002). Mean shift: a robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(5), 603-619. doi:10.1109/34.1000236
- Cooper, Elisa, Greve, Andrea, y Henson, Richard N. (2017). Assumptions behind scoring source versus item memory: Effects of age, hippocampal lesions and mild memory problems. *Cortex*, 91, 297-315. doi:10.1016/J.CORTEX.2017.01.001
- Cunha, T. R., Della Vecchia, M. P., Regis, R. R., Ribeiro, A. B., Muglia, V. A., Mestriner, W., y de Souza, R. F. (2013). A randomised trial on simplified and conventional methods for complete denture fabrication: masticatory performance and ability. *Journal of Dentistry*, 41(2), 133-42. doi:10.1016/j.jdent.2012.09.008
- Dai, Ruoxi, Lam, Otto L. T., Lo, Edward C. M., Li, Leonard S. W., Wen, Yifeng, y McGrath, Colman. (2014). Orofacial functional impairments among patients following stroke: a systematic review. *Oral Diseases*. doi:10.1111/odi.12274
- Daniels, Stephanie K., Corey, David M., Barnes, Cristen L., Fauchaux, Nikki M., Priestly, Daniel H., y Foundas, Anne L. (2002). Cortical Representation of Swallowing: A Modified Dual Task Paradigm. *Perceptual and Motor Skills*, 94(3), 1029-1040. doi:10.2466/pms.2002.94.3.1029
- Daumas, B., Xu, W. L., y Bronlund, J. (2005). Jaw mechanism modeling and simulation. *Mechanism and Machine Theory*, 40(7), 821-833. doi:10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2004.12.011
- Deniz, D. A., y Kulak Ozkan, Y. (2013). The influence of occlusion on masticatory performance and satisfaction in complete denture wearers. *Journal of Oral Rehabilitation*, 40(2), 91-8. doi:10.1111/joor.12015
- Doty, Robert W., Richmond, William H., y Storey, Arthur T. (1967). Effect of medullary lesions on coordination of deglutition. *Experimental Neurology*, 17(1), 91-106. doi:10.1016/0014-4886(67)90125-2

- Eberhard, L., Schindler, H. J., Hellmann, D., Schmitter, M., Rammelsberg, P., y Giannakopoulos, N. N. (2012). Comparison of particle-size distributions determined by optical scanning and by sieving in the assessment of masticatory performance. *Journal of oral rehabilitation*, 39(5), 338-48. doi:10.1111/j.1365-2842.2011.02275.x
- Endo, Toshiya, Komatsuzaki, Akira, Kurokawa, Hiroomi, Tanaka, Satoshi, Kobayashi, Yoshiki, y Kojima, Koji. (2014). A two-colored chewing gum test for assessing masticatory performance: a preliminary study. *Odontology / the Society of the Nippon Dental University*, 102(1), 68-75. doi:10.1007/s10266-012-0089-7
- Forde, C. G., van Kuijk, N., Thaler, T., de Graaf, C., y Martin, N. (2013). Texture and savoury taste influences on food intake in a realistic hot lunch time meal. *Appetite*, 60, 180-186. doi:10.1016/J.APPET.2012.10.002
- Gaudenz, J. V. (1900). Ueber die Zerkleinerung und Lijsung von Nahrungsmitteln beim kauact. *Archive for Hygiene*, 39, 230-251.
- Gertych, Arkadiusz, Ma, Zhaoxuan, Tajbakhsh, Jian, Velásquez-Vacca, Adriana, y Knudsen, Beatrice S. (2015). Rapid 3-D delineation of cell nuclei for High-content screening platforms. *Computers in Biology and Medicine*. doi:10.1016/j.combiomed.2015.04.025
- Gil-Montoya, J. A., Subirá, C., Ramón, J. M., y González-Moles, M. A. (2008). Oral health-related quality of life and nutritional status. *Journal of public health dentistry*, 68(2), 88-93. doi:10.1111/j.1752-7325.2007.00082.x
- Gotfredsen, Klaus, y Walls, Angus W. G. (2007). What dentition assures oral function? *Clinical Oral Implants Research*, 18(s3), 34-45. doi:10.1111/j.1600-0501.2007.01436.x
- Halazonetis, D. J., Schimmel, M., Antonarakis, G. S., y Christou, P. (2013). Novel software for quantitative evaluation and graphical representation of masticatory efficiency. *Journal of Oral Rehabilitation*, 40(5), 329-35. doi:10.1111/joor.12043
- Hama, Yohei, Hosoda, Akemi, Komagamine, Yuriko, Gotoh, Sachi, Kubota, Chieko,

- Kanazawa, Manabu, y Minakuchi, Shunsuke. (2017). Masticatory performance-related factors in preschool children: Establishing a method to assess masticatory performance in preschool children using colour-changeable chewing gum. *Journal of Oral Rehabilitation*. doi:10.1111/joor.12553
- Hama, Yohei, Kanazawa, Manabu, Minakuchi, Shunsuke, Uchida, Tatsuro, y Sasaki, Yoshiyuki. (2014a). Properties of a color-changeable chewing gum used to evaluate masticatory performance. *Journal of Prosthodontic Research*, 58(2), 102-6. doi:10.1016/j.jpdr.2013.12.005
- Hama, Yohei, Kanazawa, Manabu, Minakuchi, Shunsuke, Uchida, Tatsuro, y Sasaki, Yoshiyuki. (2014b). Reliability and validity of a quantitative color scale to evaluate masticatory performance using color-changeable chewing gum. *Journal of Medical and Dental Sciences*, 61(1), 1-6.
- Hamdy, S., Aziz, Q., Thompson, D. G., y Rothwell, J. C. (2001). Physiology and Pathophysiology of the Swallowing Area of Human Motor Cortex. *Neural Plasticity*, 8(1-2), 91-97. doi:10.1155/NP.2001.91
- Hamdy, S., Mikulis, D. J., Crawley, A., Xue, S., Lau, H., Henry, S., y Diamant, N. E. (1999). Cortical activation during human volitional swallowing: an event-related fMRI study. *The American journal of physiology*, 277(1 Pt 1), G219-25. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10409170>
- Hatch, Theodore, y Choate, Sarah P. (1929). Statistical description of the size properties of non uniform particulate substances. *Journal of the Franklin Institute*, 207(3), 369-387. doi:10.1016/S0016-0032(29)91451-4
- Haykin, Simon. (1998). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*.
- Herring, Susan W. (2007). Masticatory muscles and the skull: a comparative perspective. *Archives of oral biology*, 52(4), 296-9. doi:10.1016/j.archoralbio.2006.09.010
- Hirano, Yoshiyuki, Obata, Takayuki, Kashikura, Kenichi, Nonaka, Hiroi, Tachibana, Atsumichi, Ikehira, Hiroo, y Onozuka, Minoru. (2008). Effects of chewing in working memory processing. *Neuroscience Letters*, 436(2), 189-192. doi:10.1016/J.NEULET.2008.03.033

- Hrycyszyn, Alan W., y Basmajian, John V. (1972). Electromyography of the oral stage of swallowing in man. *American Journal of Anatomy*, 133(3), 333-340. doi:10.1002/aja.1001330307
- Ishihara, Sayaka, Nakauma, Makoto, Funami, Takahiro, Odake, Sachiko, y Nishinari, Katsuyoshi. (2011). Swallowing profiles of food polysaccharide gels in relation to bolus rheology. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 1016-1024. doi:10.1016/J.FOODHYD.2010.09.022
- Jolliffe, Ian. (2002). *Principal Component Analysis*. New York: Springer-Verlag. doi:10.1007/b98835
- Judd, Deane B. (1940). Hue Saturation and Lightness of Surface Colors with Chromatic Illumination. *Journal of the Optical Society of America*, 30(1), 2. doi:10.1364/JOSA.30.000002
- Käyser, A. F., y van der Hoeven, J. S. (1977). Colorimetric determination of the masticatory performance. *Journal of Oral Rehabilitation*, 4(2), 145-8. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/266051>
- Keller, Joseph B., Hedden, Trey, Thompson, Todd W., Anteraper, Sheeba A., Gabrieli, John D. E., y Whitfield-Gabrieli, Susan. (2015). Resting-state anticorrelations between medial and lateral prefrontal cortex: Association with working memory, aging, and individual differences. *Cortex*, 64, 271-280. doi:10.1016/J.CORTEX.2014.12.001
- Kimoto, Suguru, Yamamoto, S., Shinomiya, M., y Kawai, Y. (2010). Randomized controlled trial to investigate how acrylic-based resilient liner affects on masticatory ability of complete denture wearers. *Journal of Oral Rehabilitation*, 37(7), 553-9. doi:10.1111/j.1365-2842.2010.02070.x
- Kubo, Kin-ya, Yamada, Yukiko, Inuma, Mitsuo, Iwaku, Fumihiko, Tamura, Yasuo, Watanabe, Kazuko, ... Onozuka, Minoru. (2007). Occlusal disharmony induces spatial memory impairment and hippocampal neuron degeneration via stress in SAMP8 mice. *Neuroscience Letters*, 414(2), 188-191. doi:10.1016/J.NEULET.2006.12.020
- Lund, J. P. (1991, enero 1). Mastication and its control by the brain stem. *Critical*

Reviews in Oral Biology and Medicine. International and American Associations for Dental Research. doi:10.1177/10454411910020010401

- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. En *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics*. The Regents of the University of California.
- Magalhães, I. B., Pereira, L. J., Andrade, A. S., Gouvea, D. B., y Gameiro, G. H. (2014). The influence of fixed orthodontic appliances on masticatory and swallowing threshold performances. *Journal of Oral Rehabilitation*, 41(12), 897-903. doi:10.1111/joor.12218
- Manly, R. S., y Braley, L. C. (1950). Masticatory Performance and Efficiency. *Journal of Dental Research*, 29(4), 448-462. doi:10.1177/00220345500290040701
- Matthews, B. W. (1975). Comparison of the predicted and observed secondary structure of T4 phage lysozyme. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Protein Structure*, 405(2), 442-451. doi:10.1016/0005-2795(75)90109-9
- Mendonca, Daniela Baccelli Silveira, Prado, Marisa Martins da Silva, Mendes, Francielle Alves, Borges, Tania de Freitas, Mendonça, Gustavo, do Prado, Célio Jesus, y Neves, Flávio Domingues. (2009). Comparison of masticatory function between subjects with three types of dentition. *The International Journal of Prosthodontics*, 22(4), 399-404. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19639080>
- Morimoto, T., Inoue, T., Nakamura, T., y Kawamura, Y. (1984). Frequency-dependent Modulation of Rhythmic Human Jaw Movements. *Journal of Dental Research*, 63(11), 1310-1314. doi:10.1177/00220345840630111201
- Mowlana, F., Heath, M. R., van der Bilt, A., y van der Glas, H. W. (1994). Assessment of chewing efficiency: a comparison of particle size distribution determined using optical scanning and sieving of almonds. *Journal of Oral Rehabilitation*, 21(5), 545-551. doi:10.1111/j.1365-2842.1994.tb01168.x
- Neill, D. J., y Roberts, B. J. (1973). The effect of denture fixatives on masticatory performance in complete denture patients. *Journal of Dentistry*, 1(5), 219-222.

doi:10.1016/0300-5712(73)90064-X

- Newton, J. P., Yemm, R., Abel, R. W., y Menhinick, S. (1993). Changes in human jaw muscles with age and dental state. *Gerodontology*, 10(1), 16-22. doi:10.1111/j.1741-2358.1993.tb00074.x
- Nixon, Mark. (2008). *Feature Extraction & Image Processing*. London: Elsevier.
- Olthoff, L. W., van der Bilt, A., Bosman, F., y Kleizen, H. H. (1984). Distribution of particle sizes in food comminuted by human mastication. *Archives of Oral Biology*, 29(11), 899-903.
- Onozuka, Minoru, Watanabe, Kazuko, Fujita, Masafumi, Tonosaki, Keiichi, y Saito, Shigeru. (2002). Evidence for involvement of glucocorticoid response in the hippocampal changes in aged molarless SAMP8 mice. *Behavioural Brain Research*, 131(1-2), 125-129. doi:10.1016/S0166-4328(01)00378-3
- Onozuka, Minoru, Watanabe, Kazuko, Mirbod, Seyed M., Ozono, Satoru, Nishiyama, Katsuhiko, Karasawa, Nobuyuki, y Nagatsu, Ikuko. (1999). Reduced mastication stimulates impairment of spatial memory and degeneration of hippocampal neurons in aged SAMP8 mice. *Brain Research*, 826(1), 148-153. doi:10.1016/S0006-8993(99)01255-X
- Peláez, J. I., Martínez, E. A., Vaccaro, G., y Yanez, A. H. (2016). Un modelo de detección automática de bordes en imágenes dermatoscópicas. En *CISCI 2016 - Decima Quinta Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática, Decimo Tercer Simposium Iberoamericano en Educacion, Cibernética e Informática, SIECI 2016 - Memorias*.
- Peyron, Marie-Agnès, Blanc, Olivier, Lund, James P., y Woda, Alain. (2004). Influence of Age on Adaptability of Human Mastication. *Journal of Neurophysiology*, 92(2), 773-779. doi:10.1152/jn.01122.2003
- Peyron, Marie-Agnès, Gierczynski, Isabelle, Hartmann, Christoph, Loret, Chrystel, Dardevet, Dominique, Martin, Nathalie, y Woda, Alain. (2011). Role of Physical Bolus Properties as Sensory Inputs in the Trigger of Swallowing. *PLoS ONE*, 6(6), e21167. doi:10.1371/journal.pone.0021167
- Prinz, J. F. (1999). Quantitative evaluation of the effect of bolus size and number of

- chewing strokes on the intra-oral mixing of a two-colour chewing gum. *Journal of Oral Rehabilitation*, 26(3), 243-7.
- Prinz, J. F., y Lucas, P. W. (2001). «The first bite of the cherry»: Intra-oral manipulation prior to the first bite in humans. *Journal of Oral Rehabilitation*, 28(7), 614-7.
- Rissin, L., House, J. E., Manly, R. S., y Kapur, K. K. (1978). Clinical comparison of masticatory performance and electromyographic activity of patients with complete dentures, overdentures, and natural teeth. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 39(5), 508-11. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/274543>
- Rosin, P., y Rammler, E. (1933). Gesetzmässigkeiten in der Kornzusammensetzung des zementes. *Zement*, 31, 427-433.
- Rumelhart, David E., Hinton, Geoffrey E., y Williams, Ronald J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088), 533-536. doi:10.1038/323533a0
- Salat, D. H., Buckner, Randy L., Snyder, Abraham Z., Greve, Douglas N., Desikan, Rahul S. R., Busa, Evelina, ... Fischl, Bruce. (2004). Thinning of the Cerebral Cortex in Aging. *Cerebral Cortex*, 14(7), 721-730. doi:10.1093/cercor/bhho32
- Sato, Yukihiro, Aida, Jun, Kondo, Katsunori, Tsuboya, Toru, Watt, Richard G.RG, Yamamoto, Tatsuo, ... Osaka, Ken. (2016). Tooth loss and decline in functional capacity: a prospective cohort study from the JAGES project. *Journal of the American Geriatrics Society*, 64(11), 2336-2342. doi:10.1111/jgs.14324
- Scherder, E., Posthuma, W., Bakker, T., Vuijk, P. J., y Lobbezoo, F. (2008). Functional status of masticatory system, executive function and episodic memory in older persons. *Journal of Oral Rehabilitation*, 35(5), 324-336. doi:10.1111/j.1365-2842.2007.01842.x
- Schimmel, M., Christou, P., Herrmann, F., y Müller, F. (2007). A two-colour chewing gum test for masticatory efficiency: development of different assessment methods. *Journal of Oral Rehabilitation*, 34(9), 671-8. doi:10.1111/j.1365-2842.2007.01773.x

- Schimmel, M., Leemann, B., Herrmann, F. R., Kiliaridis, S., Schnider, A., y Müller, F. (2011). Masticatory function and bite force in stroke patients. *Journal of Dental Research*, 90(2), 230-4. doi:10.1177/0022034510383860
- Schimmel, Martin, Christou, Panagiotis, Miyazaki, Hideo, Halazonetis, Demetrios, Herrmann, François R., y Müller, Frauke. (2015). A novel colourimetric technique to assess chewing function using two-coloured specimens: validation and application. *Journal of Dentistry*, 43(8), 955-964. doi:10.1016/j.jdent.2015.06.003
- Scholey, Andrew, Haskell, Crystal, Robertson, Bernadette, Kennedy, David, Milne, Anthea, y Wetherell, Mark. (2009). Chewing gum alleviates negative mood and reduces cortisol during acute laboratory psychological stress. *Physiology & Behavior*, 97(3-4), 304-312. doi:10.1016/J.PHYSBEH.2009.02.028
- Schumacher, Ger-Horst. (1980). Comparative functional anatomy of jaw muscles. En Kinziro Kubota, Yoshio Nakamura, & Ger-Horst Schumacher (Eds.), *Jaw Position and Jaw Movement: Proceedings of a Symposium on the Anatomical, Physiological and Clinical Aspects of Jaw Position and Jaw Movement Held on the Occasion of the Tenth Anniversary of the Institute of Stomatognathic Science of Tokyo Medical and* (p. 76). Volk und Gesundheit.
- Slagter, A. P., Bosman, F., y van der Bilt, A. (1993). Comminution of two artificial test foods by dentate and edentulous subjects. *Journal of Oral Rehabilitation*, 20(2), 159-176. doi:10.1111/j.1365-2842.1993.tb01599.x
- Speksnijder, C. M., Abbink, J. H., van der Glas, H. W., Janssen, N. G., y van der Bilt, A. (2009). Mixing ability test compared with a comminution test in persons with normal and compromised masticatory performance. *European Journal of Oral Sciences*, 117(5), 580-6. doi:10.1111/j.1600-0722.2009.00675.x
- Steele, Catriona M., y Miller, Arthur J. (2010). Sensory Input Pathways and Mechanisms in Swallowing: A Review. *Dysphagia*, 25(4), 323-333. doi:10.1007/s00455-010-9301-5
- Stein, Pamela Sparks, Desrosiers, Mark, Donegan, Sara Jean, Yepes, Juan F., y Kryscio, Richard J. (2007). Tooth loss, dementia and neuropathology in the Nun

- study. *Journal of the American Dental Association* (1939), 138(10), 1314-22-2.
 Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17908844>
- Stephens, Richard, y Tunney, Richard J. (2004). Role of glucose in chewing gum-related facilitation of cognitive function. *Appetite*, 43(2), 211-213. doi:10.1016/J.APPET.2004.07.006
- Su, Shaochen, Qi, Tao, Su, Baoli, Gu, Huibin, Wang, Jianlin, y Yang, Lan. (2014). Tooth loss inhibits neurogenesis in the dentate gyrus of adult mice. *Neural regeneration research*, 9(17), 1606-9. doi:10.4103/1673-5374.141786
- Suzuki, Kenji (Ed.). (2013). *Artificial Neural Networks - Architectures and Applications*. InTech. doi:10.5772/3409
- Sybil, Deborah, y Gopalkrishnan, K. (2013). Assessment of Masticatory Function Using Bite Force Measurements in Patients Treated for Mandibular Fractures. *Craniofacial Trauma and Reconstruction*, 6(4), 247-250. doi:10.1055/s-0033-1356755
- The Glossary of Prosthodontic Terms. (2005). *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 94(1), 10-92. doi:10.1016/j.prosdent.2005.03.013
- The Wrigley Company Ltd. (2016). Goose Island, United States.
- Tsutsui, Keisuke, KAKU, Masato, Motokawa, Masahide, TOHMA, Yuiko, Kawata, Toshitsugu, Fujita, Tadashi, ... Tanne, Kazuo. (2007). Influences of reduced masticatory sensory input from soft-diet feeding upon spatial memory/learning ability in mice. *Biomedical Research*, 28(1), 1-7. doi:10.2220/biomedres.28.1
- Tucha, Oliver, Mecklinger, Lara, Maier, Kerstin, Hammerl, Marianne, y Lange, Klaus W. (2004). Chewing gum differentially affects aspects of attention in healthy subjects. *Appetite*, 42(3), 327-329. doi:10.1016/J.APPET.2004.01.003
- Turkawski, S. J. J., Van Eijden, T. M. G. J., y Weijs, W. A. (1998). Force Vectors of Single Motor Units in a Multipennate Muscle. *Journal of Dental Research*, 77(10), 1823-1831. doi:10.1177/00220345980770101001
- Vaccaro, G., y Pelaez, J. I. (2014). Dental tissue classification using computational intelligence and digital image analysis. En *Biodental Engineering III* -

Proceedings of the 3rd International Conference on Biomedical Engineering, BIODENTAL 2014 (pp. 221-226). Taylor and Francis - Balkema.
doi:10.1201/b17071

- Vaccaro, Gustavo, Pelaez, José Ignacio, y Gil, José Antonio. (2016). Choosing the best image processing method for masticatory performance assessment when using two-coloured specimens. *Journal of Oral Rehabilitation*, 43(7), 496-504. doi:10.1111/joor.12392
- van der Bilt, A., Mojet, J., Tekamp, F. A., y Abbink, J. H. (2010). Comparing masticatory performance and mixing ability. *Journal of Oral Rehabilitation*, 37(2), 79-84. doi:10.1111/j.1365-2842.2009.02040.x
- van der Bilt, A., van der Glas, H. W., Mowlana, F., y Heath, M. R. (1993). A comparison between sieving and optical scanning for the determination of particle size distributions obtained by mastication in man. *Archives of Oral Biology*, 38(2), 159-162. doi:10.1016/0003-9969(93)90201-V
- van der Bilt, Andries. (2011). Assessment of mastication with implications for oral rehabilitation: a review. *Journal of Oral Rehabilitation*, 38(10), 754-80. doi:10.1111/j.1365-2842.2010.02197.x
- van der Bilt, Andries, Burgers, M., van Kampen, F. M. C., y Cune, M. S. (2010). Mandibular implant-supported overdentures and oral function. *Clinical Oral Implants Research*, 21(11), 1209-13. doi:10.1111/j.1600-0501.2010.01915.x
- Veredas, Francisco, Mesa, Héctor, y Morente, Laura. (2010). Binary tissue classification on wound images with neural networks and bayesian classifiers. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 29(2), 410-27. doi:10.1109/TMI.2009.2033595
- Vezhnevets, Vladimir, Sazonov, Vassili, y Andreeva, Alla. (2003). A Survey on Pixel-Based Skin Color Detection Techniques. En *Graphicon-2003* (pp. 85-92). Moscow, Russia.
- Wang, Shui-Hua, Zhang, Yin, Li, Yu-Jie, Jia, Wen-Juan, Liu, Fang-Yuan, Yang, Meng-Meng, y Zhang, Yu-Dong. (2016). Single slice based detection for Alzheimer's disease via wavelet entropy and multilayer perceptron trained by

- biogeography-based optimization. *Multimedia Tools and Applications*, 1-25. doi:10.1007/s11042-016-4222-4
- Watanabe, Kazuko, Ozono, Satoru, Nishiyama, Katsuhiko, Saito, Shigeru, Tonosaki, Keiichi, Fujita, Masafumi, y Onozuka, Minoru. (2002). The molarless condition in aged SAMP8 mice attenuates hippocampal Fos induction linked to water maze performance. *Behavioural Brain Research*, 128(1), 19-25. doi:10.1016/S0166-4328(01)00268-6
- Weijenberg, R. A. F., Scherder, E. J. A., y Lobbezoo, F. (2011). Mastication for the mind—The relationship between mastication and cognition in ageing and dementia. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 35(3), 483-497. doi:10.1016/J.NEUBIOREV.2010.06.002
- Weijenberg, R. A. F., Scherder, E. J. A., Visscher, C. M., Gorissen, T., Yoshida, E., y Lobbezoo, F. (2013). Two-colour chewing gum mixing ability: digitalisation and spatial heterogeneity analysis. *Journal of Oral Rehabilitation*, 40(10), 737-43. doi:10.1111/joor.12090
- Wilkinson, Lucy, Scholey, Andrew, y Wesnes, Keith. (2002). Chewing gum selectively improves aspects of memory in healthy volunteers. *Appetite*, 38(3), 235-236. doi:10.1006/APPE.2002.0473
- Yamamoto, Tetsu, y Hirayama, Akihiko. (2001). Effects of soft-diet feeding on synaptic density in the hippocampus and parietal cortex of senescence-accelerated mice. *Brain Research*, 902(2), 255-263. doi:10.1016/S0006-8993(01)02410-6
- Yamashita, S., Hatch, J. P., y Rugh, J. D. (1999). Does chewing performance depend upon a specific masticatory pattern? *Journal of Oral Rehabilitation*, 26(7), 547-53.
- Yoshikawa, M., Yoshida, M., Nagasaki, T., Tanimoto, K., Tsuga, K., Akagawa, Y., y Komatsu, T. (2005). Aspects of Swallowing in Healthy Dentate Elderly Persons Older Than 80 Years. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 60(4), 506-509. doi:10.1093/gerona/60.4.506
- Zhang, Yudong, Sun, Yi, Phillips, Preetha, Liu, Ge, Zhou, Xingxing, y Wang, Shuihua.

(2016). A Multilayer Perceptron Based Smart Pathological Brain Detection System by Fractional Fourier Entropy. *Journal of Medical Systems*, 40(7), 173. doi:10.1007/s10916-016-0525-2

Zhang, Yudong, Wang, Shuihua, Phillips, Preetha, y Ji, Genlin. (2014). Binary PSO with mutation operator for feature selection using decision tree applied to spam detection. *Knowledge-Based Systems*, 64, 22-31. doi:10.1016/j.knosys.2014.03.015

VII. ANEXOS

1. ANEXO 1: ESQUEMA XML DEL MODELO ENTRENADO

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<xs:schema id="XS_MEPAT"
  targetNamespace="MainCore:MEPATData"
  elementFormDefault="qualified"
  xmlns="MainCore:MEPATData"
  xmlns:mstns="MainCore:MEPATData"
  xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <xs:element name="MEPAT">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence maxOccurs="unbounded">
        <xs:element ref="Calibration"></xs:element>
      </xs:sequence>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:element name="Calibration">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element ref="TestFood" maxOccurs="1"></xs:element>
        <xs:element ref="ExperimentalSettings" maxOccurs="1"></xs:element>
        <xs:element ref="Characteristics" maxOccurs="unbounded"></xs:element>
        <xs:element ref="Classifier"></xs:element>
        <xs:element ref="Operator"></xs:element>
        <xs:element ref="Performance"></xs:element>
      </xs:sequence>
      <xs:attribute name="UID" type="xs:string"></xs:attribute>
      <xs:attribute name="CreationDate" type="xs:string"></xs:attribute>
      <xs:attribute name="UploadDate" type="xs:string"></xs:attribute>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:element name="TestFood">
    <xs:complexType>
      <xs:attribute name="Type" use="required">
        <xs:simpleType>
          <xs:list itemType="TFType"></xs:list>
        </xs:simpleType>
      </xs:attribute>
      <xs:attribute name="Brand" type="xs:string" use="required"/>
      <xs:attribute name="Color1" type="xs:string" use="required"/>
      <xs:attribute name="Color2" type="xs:string" use="required"/>
      <xs:attribute name="Origin" type="xs:string" use="required"/>
      <xs:attribute name="Details" type="xs:string" use="optional"/>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:simpleType name="TFType">
    <xs:restriction base="xs:string">
      <xs:enumeration value="gum"/>
      <xs:enumeration value="parafin"/>
    </xs:restriction>
  </xs:simpleType>
  <xs:element name="ExperimentalSettings">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element name="Name" type="xs:string"></xs:element>
      </xs:sequence>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
</xs:schema>
```

```

    <xs:element name="NumberOfPatients" type="xs:integer"></xs:element>
    <xs:element ref ="ChewingCicles" maxOccurs="unbounded"></xs:element>
    <xs:element name="EvaluationCycles" type="xs:integer"></xs:element>
    <xs:element ref="ClinicalProcedure" maxOccurs="unbounded"></xs:element>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>
</xs:element>

<xs:element name="ChewingCicles">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref ="Cycle" maxOccurs="unbounded"></xs:element>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name ="Cycle" type="xs:integer"> </xs:element>
<xs:element name ="ClinicalProcedure" type="xs:string"></xs:element>
<xs:element name="Operator">
  <xs:complexType>
    <xs:attribute name="FullName" type="xs:string"></xs:attribute>
    <xs:attribute name="Country" type="xs:string"></xs:attribute>
    <xs:attribute name="City" type="xs:string"></xs:attribute>
    <xs:attribute name="Affiliation" type="xs:string"></xs:attribute>
    <xs:attribute name="Email" type="xs:string"></xs:attribute>
    <xs:attribute name="ContactPhone" type="xs:string"></xs:attribute>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name ="Classifier">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="ANN"></xs:element>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="ANN">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref ="Layer" maxOccurs="unbounded"></xs:element>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="Layer">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="Neuron" maxOccurs="unbounded"></xs:element>
    </xs:sequence>
    <xs:attribute name="Index" type="xs:int"></xs:attribute>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="Neuron">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref ="Weight" maxOccurs="unbounded"></xs:element>
    </xs:sequence>
    <xs:attribute name="Index" type="xs:integer"></xs:attribute>
  </xs:complexType>
</xs:element>

```

```

    </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="Weight">
  <xs:complexType>
    <xs:attribute name="Index" type="xs:integer"></xs:attribute>
    <xs:attribute name="Value" type="xs:double"></xs:attribute>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="Characteristics">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="Feature" maxOccurs="unbounded"></xs:element>
    </xs:sequence>
    <xs:attribute name="Optimal" type="xs:string"></xs:attribute>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="Feature">
  <xs:complexType>
    <xs:attribute name="Index" type="xs:integer"></xs:attribute>
    <xs:attribute name="MFC" type="xs:string"></xs:attribute>
    <xs:attribute name="Description" type="xs:string"></xs:attribute>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="Performance">
  <xs:complexType>
    <xs:attribute name="Sensitivity" type="xs:double"></xs:attribute>
    <xs:attribute name="Specificity" type="xs:double"></xs:attribute>
    <xs:attribute name="Accuracy" type="xs:double"></xs:attribute>
  </xs:complexType>
</xs:element>
</xs:schema>

```