



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE MEDICINA

TESIS

**ANÁLISIS CUANTITATIVO DE MOVIMIENTOS MANDIBULARES
PARA LA CLASIFICACIÓN DE TRASTORNOS
TEMPOROMANDIBULARES POR MEDIO DE UN SISTEMA DE
VISIÓN COMPUTACIONAL**

PRESENTA

Mónica Castillo Juárez

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN INVESTIGACIÓN BIOMÉDICA

TUTOR

Dr. Omar Gutiérrez Navarro

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORAL

Dr. David Masuoka Ito

Dr. Gabriela Vilar Pineda

Aguascalientes, Ags, 3 de junio del 2022

CARTA DE VOTO APROBATORIO
COMITÉ TUTORAL

Dra. Paulina Andrade Lozano
DECANA INTERINA DEL CENTRO DE CIENCIAS DE LA SALUD

PRESENTE

Por medio del presente como Miembros del Comité Tutorial designado del estudiante **MONICA CASTILLO JUÁREZ** con ID 177370 quien realizó el trabajo de tesis titulado: **ANÁLISIS CUANTITATIVO DE MOVIMIENTOS MANDIBULARES PARA LA CLASIFICACIÓN DE TRASTORNOS TEMPOROMANDIBULARES POR MEDIO DE UN SISTEMA DE VISIÓN COMPUTACIONAL**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia damos nuestro consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que nos permitimos emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirlo así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Ponemos lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, le enviamos un cordial saludo.


ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 3 de junio de 2022.



Dr. David Masuoka Ito
Tutor de tesis



Dr. David Masuoka Ito
Asesor de tesis



Mtra. Gabriela Vilar Pineda
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-16
Actualización: 00
Emisión: 17/05/19



DICTAMEN DE LIBERACIÓN ACADÉMICA PARA INICIAR LOS TRÁMITES DEL EXAMEN DE GRADO



Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 07/06/2022

NOMBRE: MÓNICA CASTILLO JUÁREZ **ID:** 177370

PROGRAMA: MAESTRÍA EN INVESTIGACIÓN BIOMÉDICA **LGAC (del posgrado):** BIOMEDICINA CLÍNICA

TIPO DE TRABAJO: (X) Tesis () Trabajo Práctico
ANÁLISIS CUANTITATIVO DE MOVIMIENTOS MANIBULARES PARA LA CLASIFICACIÓN DE TRASTORNOS TEMPOROMANIBULARES POR MEDIO DE UN SISTEMA DE VISIÓN COMPUTACIONAL

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): Esta tesis genera conocimiento sobre el un procedimiento que permitirá definir de forma más precisa la posición de la mandíbula con métodos más económicos y efectivos

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>				
SI				El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI				La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI				Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI				Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI				Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI				El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI				Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
SI				Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI				Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>				
SI				Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI				Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI				Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
SI				Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI				Coincide con el título y objetivo registrado
SI				Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI				Tiene el CVU del Conacyt actualizado
No				Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>				
N.A.				Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.				El estudiante es el primer autor
N.A.				El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.				En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.				Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.				La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

SI X
No

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

DR. RICARDO ERNESTO RAMÍREZ OROZCO

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

DR. LUIS FERNANDO BARBA GALLARDO

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del MAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o exviro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

DR. RICARDO ERNESTO RAMÍREZ OROZCO

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

DRA. PAULINA ANDRADE LOZANO

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: "Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

Elaborado por: D. Apoyo al Posgrado
Revisado por: D. Control Escolar/D. Gestión de Calidad
Aprobado por: D. Control Escolar/D. Apoyo al Posgrado

Código: DG-SEE-PO-15
Actualización: 01
Evisión: 28/04/20

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor y asesores...

Por la confianza y las facilidades para poder culminar mis estudios. Enseñarme y ser una guía en este trabajo. Además de convertirse en una fuente de inspiración y dejar de tenerle miedo a lo desconocido.

A Dalia, Nalle y Dani...

Que además de ser un apoyo para realizar este trabajo, se convirtieron en amigas, mujeres extraordinarias y sobre todo en profesionistas con grandes ambiciones. Gracias por demostrarme ese apoyo, mi más sincero agradecimiento. Mostrando que las mejores personas las conoces en momentos especiales.

A los profesores y alumnos...

Los cuales formaron parte del proyecto y ayudaron en tiempos difíciles durante la pandemia.

A Dios...

Por permitirme estar aquí, culminando una etapa más en mi vida profesional. Gracias por ponerme en el momento exacto, en el lugar exacto y permitirme conocer a tanta gente tan gentil y hermosa. Pero sobre todo por la dicha de tener a tan increíble familia, mi prometido fabuloso, por los verdaderos amigos y las personas que me han apoyado en las buenas y en las malas.

A mi familia....

Por siempre creer en mi

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
A. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	12
B. JUSTIFICACIÓN	12
C. ALCANCES	13
D. LIMITACIONES.....	13
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	14
A. ARTICULACIÓN TEMPOROMANDIBULAR.....	14
i. Definición.....	14
ii. Componentes anatómicos.....	14
B. TRASTORNOS DE LA ARTICULACIÓN TEMPOROMANDIBULAR	15
i. Definición.....	15
ii. Prevalencia o incidencia de los trastornos	16
iii. Fisiopatología del trastorno.....	16
iv. Etiología del trastorno	17
v. Factores de riesgo.....	17
C. BIOMECÁNICA Y KINESIOLOGÍA MANDIBULAR	18
D. EQUIPOS UTILIZADOS PARA EL DIAGNÓSTICO DE TTM.....	19
CARACTERÍSTICAS	20
i. Radiología convencional	20
ii. Tomografía convencional	20
iii. Tomografía computarizada.	20
iv. Artrografía	21
v. Resonancia Magnética.....	21
E. SENSIBILIDAD Y ESPECIFICIDAD	21
F. PRINCIPIO PARA LA MEDICIÓN DE LA ATM	21

i.	Eje I de la DC/TMD.....	22
ii.	El Eje II de la DC/TMD.....	22
G.	ANTECEDENTES DE USO DE UN SISTEMA DE VISIÓN.....	23
H.	CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA VISIÓN COMPUTACIONAL.....	25
i.	Visión Computacional.....	25
ii.	Calibración del sistema.....	25
iii.	Marcadores arUco.....	28
I.	CARACTERÍSTICAS DE APRENDIZAJE MÁQUINA.....	28
i.	Regresión Logística.....	28
ii.	Eliminación Recursiva de Características (Recursive Features Elimination).....	30
iii.	ANOVA y suma de cuadrados tipo II.....	31
iv.	Máquina de soporte vectorial.....	33
v.	Rendimiento de los algoritmos de aprendizaje máquina.....	37
J.	OBJETIVO GENERAL.....	39
i.	Objetivos Específicos.....	39
ii.	Hipótesis.....	40
CAPÍTULO 3.	METODOLOGÍA.....	41
A.	TIPO DE ESTUDIO.....	41
B.	UNIVERSO DE TRABAJO.....	47
C.	MUESTRA.....	47
D.	SELECCIÓN Y/O ASIGNACIÓN DE PARTICIPANTES O UNIDADES DE OBSERVACIÓN.....	47
i.	Criterios de selección (inclusión, exclusión y eliminación).....	47
ii.	Criterios de inclusión.....	47
iii.	Criterios de no inclusión.....	47
iv.	Criterios de eliminación.....	48
E.	VARIABLES (INDEPENDIENTE, DEPENDIENTE Y DE CONTROL).....	49
F.	ESCALAS DE MEDICIÓN Y UNIDADES DE MEDICIÓN VARIABLES.....	50
i.	Escalas de medición:.....	50
ii.	Unidades de medición:.....	50
G.	TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	51
i.	Protocolo de proceso de reclutamiento de pacientes.....	51
ii.	Adquisición de datos cuantitativas por Sistema de visión.....	52

- iii. Adquisición de datos cuantitativas por evaluación DC/TMD 54
- H. EQUIPO IMPLEMENTADO PARA LA ADQUISICIÓN POR MEDIO DEL SISTEMA DE VISIÓN COMPUTACIONAL 54
 - i. Estación de trabajo (Equipo de cómputo) 54
- CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS 55
 - A. EXPLORACIÓN INICIAL DE VARIABLES..... 55
 - i. Filtrado de puntos atípicos 55
 - ii. Corrección de línea base..... 55
 - iii. Estandarización de los datos 56
 - iv. Detección de puntos atípicos 57
 - v. Selección de características 59
 - vi. Aprendizaje máquina supervisado 61
- CAPÍTULO 5. CONSIDERACIONES ÉTICAS DEL ESTUDIO 62
- CAPÍTULO 6. RESULTADOS 63
 - A. CORRELACIÓN DE PEARSON 65
 - B. REGRESIÓN LOGÍSTICA PARA REDUCCIÓN DE DIMENSIONALIDAD (MÉTODO ELIMINACIÓN RECURSIVA DE CARACTERÍSTICAS)..... 66
 - C. ANOVA TIPO II..... 71
 - D. MÁQUINA DE SOPORTE VECTORIAL Y RENDIMIENTO..... 73
 - E. CURVA ROC..... 75
- DISCUSIÓN..... 81
- CONCLUSIONES..... 85
- REFERENCIAS..... 86
- ANEXOS 96
 - A. CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA LOS PACIENTES DE LA INVESTIGACIÓN..... 96
 - B. DC/TMD 99
 - C. DIAGRAMA DE CAJA DE CARACTERÍSTICAS CON MAYOR DIFERENCIA 101
 - D. CALIBRACIÓN DEL SVC..... 105
 - E. CORRELACIÓN DE PEARSON 106
 - F. ELIMINACIÓN RECURSIVA DE CARACTERÍSTICAS (RFE) 106
 - G. ANOVA CON SUMA DE CUADRADOS TIPO II 108
 - H. RENDIMIENTO SVM. 110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Coeficientes de distorsión y su expresión matemática..... 27

Tabla 2 Tabla del resumen de suma de cuadrados tipo II..... 32

Tabla 3 Tipos de kernel implementados en SVM 36

Tabla 4 Variables del estudio 49

Tabla 5 Escala normal para los distintos ejercicios 50

Tabla 6 Matriz de observaciones y variables iniciales 59

Tabla 7 Matriz de características..... 63

Tabla 8 Características seleccionadas 65

Tabla 9 Características seleccionadas después del ACP 66

Tabla 10 Clasificación de las diferentes Trastornos Temporomandibulares 67

Tabla 11 Definición de características seleccionadas y expresión matemática. ... 71

Tabla 12 Características con mayor grado de importancia 73

Tabla 13 Implementación del método de ANOVA en MG vs AG..... 72

Tabla 14 Implementación del método de ANOVA en CG vs MG vs AG..... 72

Tabla 15 Implementación del método de ANOVA en CG vs DG..... 72

Tabla 16 Implementación del método de ANOVA en CG vs MG 72

Tabla 17 Implementación del método de ANOVA en CG vs AG 72

Tabla 18 Rendimiento del algoritmo de SVM con el kernel lineal..... 73

Tabla 19 Rendimiento del algoritmo de SVM con el kernel rbf..... 74

Tabla 20 Rendimiento del algoritmo de SVM con el kernel polinomial..... 74

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Figura 1 Estructuras de la ATM..... 15

Figura 2 Ubicación de la articulación temporomandibular 16

Figura 3 Distorsión radial en la imagen 26

Figura 4 Modelo de cámara estenopeica 28

Figura 5 Diccionario 4x4, Marcadores ArUco 28

Figura 6 Regresión lineal vs Regresión logística..... 29

Figura 7 Proceso de eliminación de características recursivas..... 31

Figura 8 Comportamiento de validación cruzada por estratificaciones 38

Figura 9 Diagrama de obtención y calibración de cámara 41

Figura 10 Interfaz del inicio del software uEye Cockpit 42

Figura 11 Imagen capturada para calibración 43

Figura 12 Detección de placas para calibración..... 43

Figura 13 Mejora de la distorsión de las imágenes 44

Figura 14 Colocación y detección de los marcadores ArUco 45

Figura 15 Separación de los movimientos 45

Figura 16 Diagrama de protocolo y validación de parámetros 46

Figura 17 Diagrama de desarrollo de algoritmo 46

Figura 18 Colocación de marcadores arUco en el paciente..... 52

Figura 19 Colocación de cámara y paciente. 53

Figura 20 Adquisición del marcador #2 57

Figura 21 Movimientos de Apertura y cierre..... 58

Figura 22 Movimientos de lateralidades..... 58

Figura 23 Desfase de la línea basal en los movimientos. 60

Figura 24 Correlación de Pearson..... 65

Figura 25 Diagrama del modelo de proceso del RFE..... 67

Figura 26 RFE en la subclasificación Sanos vs Mialgia vs Artralgia con n=1..... 68

Figura 27 RFE en la subclasificación de Sanos vs Mialgia vs Artralgia con n=4... 69

Figura 28 RFE en la subclasificación de Sanos vs Enfermos con n=4 69

Figura 29 RFE en la subclasificación de Sanos vs Mialgia con n=4 70

Figura 30 RFE en la subclasificación de Sanos vs Artralgia con n=4 70

Figura 31 RFE en la subclasificación de Mialgia vs Artralgia con n=4 71

Figura 32 Curva ROC entre CG contra DG..... 75

Figura 33 Curva ROC entre CG contra MG contra AG 76

Figura 34 Curva ROC entre CG y MG contra AG..... 76

Figura 35 Curva ROC entre MG contra AG..... 77

Figura 36 Curva ROC entre CG y AG contra MG..... 77
Figura 37 Curva ROC entre CG contra MG contra AG 78
Figura 38 Curva ROC entre CG contra DG..... 78
Figura 39 Curva ROC entre CG y MG contra AG..... 79
Figura 40 Curva ROC entre MG contra AG..... 79
Figura 41 Curva ROC entre CG y AG contra MG..... 80
Figura 42 Razón de cambio del área con respecto al eje Y en AC 101
Figura 43 Media de la velocidad con respecto al eje Y en AC 101
Figura 44 Media de la desviación con respecto al eje X en AC..... 102
Figura 45 Razón de cambio de la desviación con respecto al eje X en AC 102
Figura 46 Razón de cambio del área con respecto al eje X en Lat 103
Figura 47 Razón de cambio del área con respecto al eje Y en Lat 103
Figura 48 Razón de cambio de la velocidad con respecto al eje X en Lat 104
Figura 49 Media de aceleración con respecto al eje Y en Lat 104



ACRONIMOS

AC → Apertura y Cierre

ACP → Análisis de Correlación de Pearson's

AG → Grupo Artralgia (*Arthralgia Group*)

ATM → Articulación Temporomandibular

CG → Grupo Control (*Control Group*)

COVID-19 → Enfermedad por coronavirus 2019

CSV → Valores separados por comas

DC/TMD → Criterios de Diagnóstico para Trastornos Temporomandibulares (*Diagnostic of Criteria for Temporomandibular Disorders*)

DG → Grupo Enfermo (*Diseases Group*)

Lat → Lateralidades

MG → Grupo Mialgia (*Myalgia Group*)

OMS → Organización Mundial de la Salud

RFE → Eliminación recursiva de características

SLCP → Síndrome de Latigazo Cervical Posterior o Síndrome *whiplash*

SVC → Sistema de Visión Computacional

SVM → Máquina de Soporte Vectorial

TTM → Trastornos Temporomandibulares

RESUMEN

El diagnóstico de estas alteraciones se llevaba a cabo por dispositivos o protocolos que implican algunos puntos negativos importantes en la economía y practicidad tanto del usuario como del paciente. Debido al gran avance tecnológico, y procesamiento de imágenes, hoy en día se ha optado por la medición y análisis de los movimientos humanos por medio de diversas técnicas de visión computacional y algoritmos matemáticos. En esta propuesta, se desarrolla una metodología con base en el análisis cuantitativo de los movimientos mandibulares, para la clasificación de trastornos temporomandibulares (TTM) en función a su caracterización. Con el uso de un sistema de visión computacional y marcadores arUco.

El presente trabajo es un estudio transversal observacional. Donde se incluyó un total de 116 pacientes de edades entre 20 y 36 años, voluntarios de la Benemérita Universidad Autónoma de Aguascalientes. Se realizó un primer diagnóstico con el estandar de oro a todos los participantes, esto para tener la etiqueta previa. Grabamos movimientos mandibulares mediante una cámara para adquirir la posición 3D de los marcadores faciales arUco. Se obtuvieron características para evaluar la clasificación de pacientes sanos, con Mialgia y con Artralgia. Se obtuvo una sensibilidad del 93% y especificidad de 93% para clasificar a pacientes sanos de aquellos con algun TTM, con un AUC de 0.92 ± 0.02 . Además de encontrar una discrepancia entre los 3 grupos con un AUC de 0.83 ± 0.01 .

Estos resultados confirman la utilidad del seguimiento de los marcadores faciales, así como su configuración mínimamente invasiva con un bajo costo.

Este método no se ha contrastado con el diagnostico humano y los resultados pueden mejorarse con un mayor número de cámaras. Además de seguir evaluando distintas posiciones de los marcadores. No obstante, es una herramienta útil que reduciría los tiempos de espera y diagnóstico de los pacientes.

ABSTRACT

Currently, the diagnosis of these alterations was conducted by devices or protocols that imply some important negative points in the economy and practicality of both the user and the patient. Due to the great technological advance, and image processing, today it has been chosen to measure and analyze human movements with various computer vision techniques and mathematical algorithms. In this proposal, a methodology is developed based on the quantitative analysis of mandibular movements, for the classification of temporomandibular disorders (TMD) according to their characterization. With the use of a computer vision system and arUco markers.

The present work is an observational cross-sectional study. Where a total of 116 patients aged between 20 and 36 years were included, voluntarios of the Benemérita Universidad Autónoma de Aguascalientes. A first diagnosis was made with the gold standard to all participants, this to have the previous label. We record mandibular movements using a camera to acquire the 3D position of the arUco facial markers. Characteristics were obtained to evaluate the classification of healthy patients, with Myalgia and with Arthralgia. A sensitivity of 93% and specificity of 93% were obtained to classify healthy patients from those with some TMD. With an AUC of 0.92 ± 0.02 . In addition to finding a discrepancy between the 3 groups with an AUC of 0.83 ± 0.01 .

These results confirm the usefulness of tracking facial markers, as well as their minimally invasive configuration at a low cost.

This method has not been contrasted with human diagnosis and the results can be improved with a greater number of cameras. In addition to continuing to evaluate different positions of the markers. However, it is a useful tool that would reduce patient waiting and diagnosis times.

INTRODUCCIÓN.

La articulación temporomandibular (ATM) ubicada entre el hueso temporal y la mandíbula, conformada por múltiples elementos como: huesos, ligamentos y músculos que intervienen en el movimiento [1]. Representa un papel fundamental e indispensables en las funciones estomatognáticas, como la masticación, la deglución, etcétera [2], [3]. Las complicaciones de la ATM derivan a múltiples trastornos, caracterizados por dolor en los elementos que conforman dicha articulación. Inclusive puede llegar a generar dolor en músculos involucrados en la masticación y/o músculos inervados por movimientos de la cabeza y cuello [1], [4]. Su etiología es aún desconocida, de modo que la falta de conocimientos de etiopatogenia, así como las diversas manifestaciones clínicas, dificulta comprender su naturaleza [5].

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima de un 50 a 70% de la población en general manifestará algún síntoma relacionado con las alteraciones de la ATM en algún momento de su vida. Entre un 26% y 33% presenta al menos un síntoma de dolor característico de este tipo de alteraciones (dolor facial y/o articular) [6]–[8], siendo estos trastornos y la caries dental las enfermedades con mayor prevalencia [3]. Una tercera parte de los casos reportados han sido presentes en mujeres mayores de 20 años, debido al incremento del género a desarrollar patologías óseas como es la osteoartritis [5].

En la actualidad los Trastornos Temporomandibulares (TTM) ha ido en aumento en cuanto a severidad e incidencia [9]. El diagnóstico de las alteraciones de la ATM se lleva a cabo por dispositivos y/o protocolos que implican algunos puntos negativos importantes en la economía y practicidad, tanto del usuario como del paciente. Debido a su alto costo en la intervención estomatológica, la radiación para el paciente, la incomodidad que generan a quienes padecen claustrofobia, son invasivos en su mayoría, además de ser equipos de grandes dimensiones [10], [11].

Hoy en día el gran avance tecnológico y procesamiento de imágenes, ha permitido la medición y análisis de los movimientos humanos por medio de diversas técnicas y algoritmos matemáticos [12]. Las propuestas desarrolladas para el diagnóstico de los TTM se han basado en el procesamiento de imágenes obtenidas por medio de radiografía o de tomografía [13].

En esta propuesta, se plantea desarrollar una metodología para efectuar un apoyo al diagnóstico del estándar de oro (DC/TMD, por sus siglas en inglés *Diagnostic Criteria of Temporomandibular Disorders*). Para ello, utilizamos las características de movimientos mandibulares mediante la detección de marcadores arUco (colocados en el rostro del paciente). Proporcionando la posición tridimensional durante la ejecución de los movimientos, es una técnica mínimamente invasiva y pretende reducir el tiempo de evaluación en la clínica.

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este apartado se plantea la problemática desde el punto de vista epidemiológico en el estado de Aguascalientes y en México, así como de la etiología de los TTM. Así mismo profundizaremos en el proceso de diagnóstico por medio del estándar de oro (DC/TMD), las consecuencias de los TTM y la utilización de los sistemas de visión computacional en el área de la Estomatología, principalmente en la clasificación de los TTM. Aunado se muestra la pregunta de investigación, la justificación del desarrollo de la investigación, los alcances que se planean tener, así como las limitaciones del estudio.

Los trastornos de la ATM se caracterizan por dolor articular, dolor en músculos masticatorios, músculos de la cabeza, del cuello y en algunos casos de espalda. Algunos de los síntomas principales observados de las alteraciones de este tipo, son: un movimiento anormal de la mandíbula, chasquido articular durante los movimientos de apertura, cierre y lateralidad, hipersensibilidad a la palpación, así como presencia de dolor en músculos involucrados en la masticación y músculos inervados por movimientos de la cabeza y cuello [1], [14]–[16]. De igual manera, cuando la ATM se encuentra lesionada o inflamada conduce a cefaleas, dolor miofascial de los músculos y fascias involucradas [17], [18]. Desencadenando una mala calidad de vida y alimentación, ya que para no generar dolor el paciente no realiza los movimientos adecuadamente.

Su etiología es multifactorial e incluye entornos biológicos, sociales, emocionales y cognitivos. Muchos de los factores asociados a estos desórdenes incluyen condicionantes de dolor, fibromialgia, desórdenes autoinmunes, bruxismo, apnea del sueño y enfermedades psiquiátricas [19]–[21]. Derivado de su complejidad y los múltiples músculos accionados mediante el uso de la mandíbula, quienes han sufrido algún síndrome de latigazo cervical posterior (whiplash o SLCP) incrementa la probabilidad de hasta 6 veces a desarrollar alguna alteración de la ATM [22], [23].

En México la prevalencia epidemiológica va del 30 al 70% en la población general esto de acuerdo con estudios realizados en diferentes estados de la República [10], [24]–[27] afectando mayormente a pacientes entre 15 a 80 años. Conjuntamente, reportan que las mujeres entre 20 y 50 años son mayormente afectadas por su alta probabilidad para desarrollar enfermedades óseas a diferencia del género masculino [6], [28]. Existe una mayor incidencia en aquellas con algún tipo de trastornos como: la artritis degenerativa, interferencias o desarreglos oclusales; asimismo el presentar un factor psicológico-social desencadenante o agravante como es el estrés. A menudo el estado de estrés en la persona conlleva a rechinar o apretar los dientes de manera inconsciente, trastorno conocido como bruxismo [10], [18], [25], [29]. En pleno 2020, durante el desarrollo de la pandemia por COVID-19 el incremento del estrés fue notable, así como la ansiedad y depresión; desencadenando el desarrollo y aumento de bruxismo, uno de los principales factores asociado a los TTM [8], [18], [24], [25].

El proceso de diagnóstico para los TTM se ha basado en la medición y auscultación de movimientos mandibulares, como la amplitud, lateralidades y protrusión, ruidos articulares y dolor. Así mismo, la palpación y localización de dolor en los músculos, tendones y la articulación en sí misma; se ha vuelto indispensable en esta práctica, ya que es su principal fuente de información. La evaluación y medición se interpreta por medio de una valoración integral del paciente con la aplicación del DC/TMD [17].

Por otro lado, el uso de las técnicas de visión por computadora se ha utilizado principalmente para la captura del arco en la boca del paciente. Esto permite su uso para visualizar los contactos oclusales y la abrasión que pudiera tener el diente debido a una patología como el bruxismo o una mala oclusión. Además, posibilita estudiar la resistencia del material dental utilizado para la colocación de prótesis contra el crecimiento microbiano [12], [30], [31].

Debido a la poca información sobre métodos de adquisición de datos para la caracterización de movimientos mandibulares en patologías de la ATM. El presente trabajo tiene como finalidad implementar un algoritmo que nos permita analizar cuantitativamente los movimientos ejecutados por la mandíbula, además de validar el diagnóstico de la disfunción temporomandibular por medio de un sistema de seguimiento por visión de cualquier persona mayor de edad (≥ 18 años). Ya que en la actualidad no se cuenta con algún tipo de dispositivo que cumpla estas especificaciones.

A. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿El análisis cuantitativo de los movimientos mandibulares, nos permiten diferenciar a personas sanas de aquellas con TTM?

B. JUSTIFICACIÓN

Actualmente no se cuentan con estadísticas sobre este tipo de alteración de la mandíbula en la población del estado de Aguascalientes. Sin embargo, en múltiples estudios mencionan que su prevalencia en la población mexicana va de un 30 a 70% [10], [24]–[28], [32]. De acuerdo con los factores desencadenantes de la patología, se reporta que aproximadamente el 75% de la población ha presentado síntomas de estrés, esto realizado en un estudio en puntos de afluencia en 12 estados, incluyendo a Aguascalientes dentro de ellos [33]. Si bien el estrés es un factor para el desarrollo de estas alteraciones, también es asociado en altos niveles a la presencia de bruxismo que este a su vez aumenta la probabilidad de padecer algún TTM [34], [35]. El SLCP ha ganado importancia en la actualidad debido al aumento en choques por alcance como consecuencia del crecimiento del parque vehicular. Este síndrome se ha asociado en aproximadamente un 30% con las alteraciones de la ATM, ya que las

secuelas abarcan dolor crónico debido al traumatismo en cuello y cabeza; a consecuencia de la brusca apertura mandibular durante el percance automovilístico [22], [23], [36]

Hoy en día es complicado realizar un diagnóstico certero de los TTM. En la clínica odontológica, el diagnóstico depende principalmente de la auscultación y de manera generalizada se hace poco uso de nuevas tecnologías [37]. En la presente propuesta se busca utilizar métodos modernos, basados en sistemas cuantitativos, de visión computacional y mínimamente invasivos, para mejorar la calidad del diagnóstico y facilitar su uso clínico.

Busca desarrollar un método moderno, el uso de la tecnología por medio de un sistema de visión computacional de manejo intuitivo. Algunos de los beneficios que se buscan son: reducir costos, que gracias a la movilidad le permite al médico trasladar el sistema hasta el lugar donde se encuentra el paciente, lo cual es un beneficio para el usuario ya que disminuye los costos de desplazamiento. Reflejando resultados en un crecimiento demográfico, además de realizar un diagnóstico de forma oportuna, sin necesidad de haber sido sometido a métodos que generen incomodidad [38].

Con esta metodología se pretende beneficiar tanto a los pacientes como al personal que interactúa con ellos (estomatólogos, odontólogos, médico cirujano dentista, etc.). El sistema permitirá resultados más precisos al no verse involucrados errores de medición que puede llegar a generar el profesional responsable, lo que traduce en una reducción del tiempo de espera en el proceso de diagnóstico y un aumento en la calidad de vida, puesto que el principal síntoma de este tipo de patología es el dolor. Así como la reducción de gastos públicos y privados.

C. ALCANCES

El sistema es capaz de usarse en cualquier adulto que posea mandíbula, para propósitos estratégicos se enfocará mayormente en el grupo en que se presenta con mayor frecuencia la patología (mujeres mayores de 18 años) [39]. Los resultados ayudarán a realizar un método moderno con el uso de la tecnología por medio de un sistema de visión computacional de manejo intuitivo. De igual manera la técnica implementada en el sistema puede tener un mayor uso y aplicabilidad; lo cual contribuirá a beneficio del paciente y la sociedad.

D. LIMITACIONES

El dispositivo no considera las proporciones de la articulación temporomandibular en pacientes infantiles y pacientes que posean algún tipo de patología como la acatisia. Además, se está considerando un sistema de una sola vista, el cual no limita a que no podamos hacer un registro adecuado de movimientos con cambios en profundidad (como son los movimientos de protrusión y retrusión). Sin embargo, el uso de una visión múltiple es aún más exacto que este método.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este apartado se documentará sobre la anatomía, fisiología y la biomecánica de la ATM. Así mismo se documentará sobre la historia de los sistemas de visión en el área de odontoestomatología, las diferentes formas de diagnóstico y el uso de los equipos de imagenología y el seguimiento de la patología. Además se realiza una breve muestra el principio de la medición de la ATM. Así como dar a conocer la teoría matemática de los diferentes procesos utilizados para el desarrollo del algoritmo de la clasificación de los TTM. Se enuncia el objetivo general, asimismo se enumeran los objetivos específicos para lograr el uso de algoritmos de aprendizaje máquina en la clasificación y apoyo para el diagnóstico de los TTM.

A. ARTICULACIÓN TEMPOROMANDIBULAR

i. Definición

La articulación Temporomandibular es una articulación que permite movimientos en múltiples ángulos, y desplazamiento, como lo son el movimiento de lateralidad, retrusión, protrusión, apertura y cierre. La ATM tanto derecha como izquierda se encuentran justo en frente del conducto auditivo, localizada entre el hueso temporal y la mandíbula, de ahí el origen de su nombre. Las características comunes de este tipo de articulaciones sinoviales es que son conformadas por: un disco, hueso, cápsula fibrosa, líquido, membrana sinovial, y ligamentos. Sin embargo, lo que hace única y diferente a esta articulación, es su superficie articular cubierta por fibrocartílago en lugar de cartílago hialino. El movimiento no sólo se guía por la forma de los huesos, músculos y ligamentos, sino también por la oclusión de los dientes, debido a que ambas articulaciones están unidas por un solo hueso de la mandíbula y no se pueden mover independientemente una de otra [26], [40]–[42].

ii. Componentes anatómicos

Los elementos anatómicos que conforman la ATM incluyen [40], [43]:

- Una fosa mandibular: determina los movimientos de apertura y cierre.
- El cóndilo mandibular: permite la ejecución de movimientos de protrusión y retrusión dental.
- El disco articular: se encuentra entre dos huesos, y permite mejorar y ayudar a la ejecución de los movimientos mandibulares. Este divide el espacio articular en dos compartimientos: los espacios supradiscales (zona superior del disco) y los espacios infradiscales (zona inferior del disco).
- Cápsula articular: ayuda al movimiento de la mandíbula y el cráneo para cerrar la articulación.
- Los ligamentos: restringen los movimientos mandibulares, evitando posibles daños a las estructuras anatómicas.

- Músculos y nervios: se clasifican de acuerdo con su función. Dentro de los más importantes los músculos elevadores son los responsables del cierre de la mandíbula; además de ser los músculos que llevan a cabo el descenso de la mandíbula durante la apertura. Mientras que el principal nervio que lleva a cabo la inervación de la mandíbula y del sistema muscular es el nervio trigémino, así como del nervio auriculotemporal.

En la Figura 1 podemos observar las estructuras más importantes y mayor relevancia de la ATM.

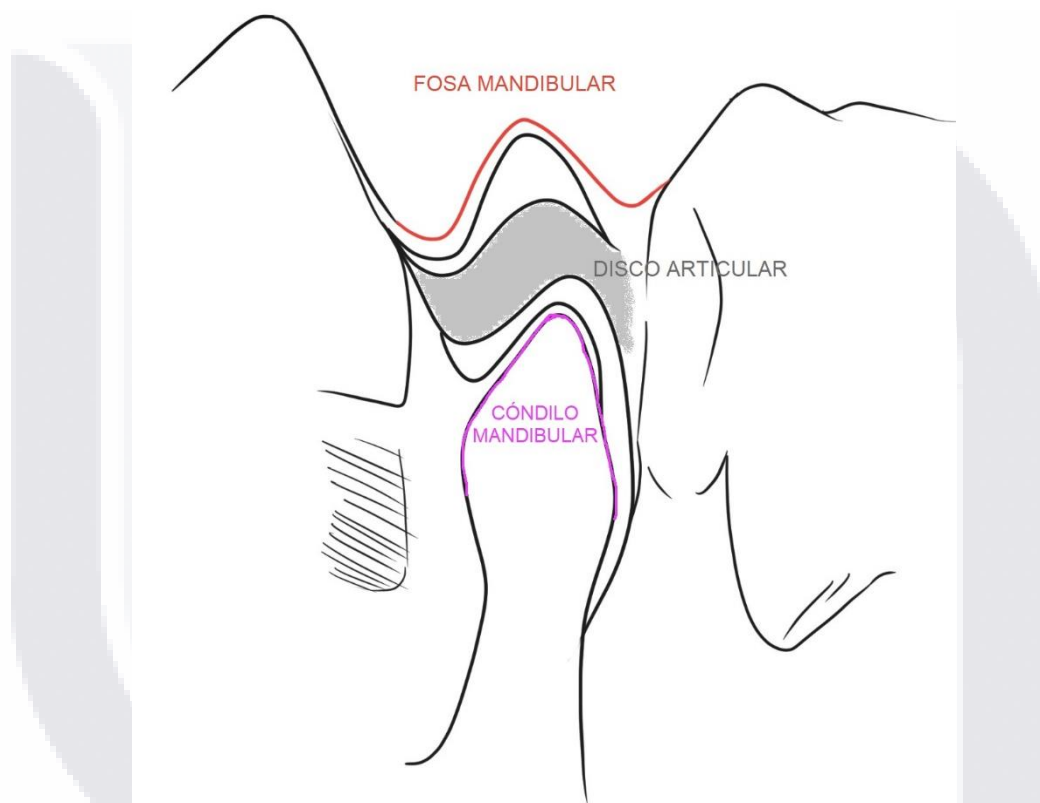


Figura 1 Se observan las estructuras de la ATM, en color rosa se muestra la ubicación del cóndilo articular, es la estructura de la mandíbula que conecta a la estructura del cráneo donde se encuentra la fosa mandibular (en color naranja). Ambas estructuras están unidas mediante el disco articular, ocupado por la estructura media entre los espacios sinovial superior e inferior.

B. TRASTORNOS DE LA ARTICULACIÓN TEMPOROMANDIBULAR

i. Definición

Los trastornos temporomandibulares se definen como un conjunto de condiciones clínicas, caracterizadas por el dolor y la disfunción del sistema masticatorio, así como estructuras musculoesqueléticas asociadas con la cabeza y cuello. Esto se debe a que la articulación temporomandibular adopta una acción de bisagra con movimientos deslizantes (protrusión), entre los síntomas más comunes se encuentran la disminución de la movilidad mandibular, dolor en los músculos de la masticación, dolor

articular, ruidos articular, dolor orofacial generalizado y limitación de la función o desviación de la mandíbula durante la ejecución de apertura y cierre como se observa en la Figura 2 [26], [27], [32], [40].

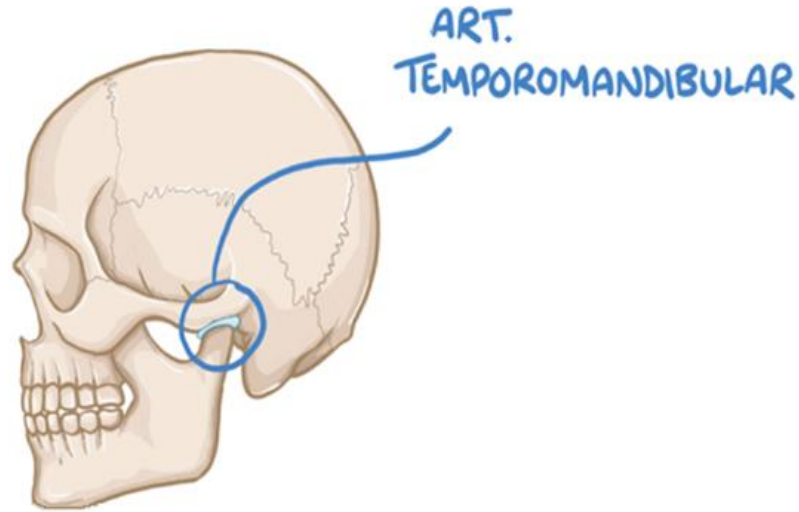


Figura 2 Ubicación de la articulación temporomandibular. [44]

Los trastornos de la articulación se pueden dividir en 2 principales categorías [3], [8], [21]:

- Mialgia implica molestias o dolor en los músculos que controlan la función de la mandíbula.
- Artralgia, a causa de un desarreglo o asimetría interna de una de las articulaciones provocado por el disco desplazado, mandíbula dislocada o lesiones del cóndilo. Así, como trastornos degenerativos e inflamatorios de las articulaciones (Artritis) que afectan a la ATM.

ii. Prevalencia o incidencia de los trastornos

El dolor de un TTM es el más común en escenarios de dolor orofacial y el segundo más común en la condición musculoesquelética, después del dolor de espalda baja [32]. La incidencia anual es de casi el 4% y los costos anuales de atención médica de TTM ascienden a cerca de \$4 mil millones de dólares, lo que pone de relieve las necesidades de tratamiento y diagnóstico oportuno [45]. En la población mexicana va de un 30 a 70%, afectando mayormente a individuos entre 15 y 50 años [24]–[28], [32].

iii. Fisiopatología del trastorno

La causa de los TTM es variable e incierta y se piensa que es multifactorial en la mayoría de los casos. De forma reciente se le ha relacionado a factores psicosociales,

genéticos, entre otros. Sin embargo, no se ha probado que casi todos los factores sean causales, pero sí que se vinculan con los TTM [3].

iv. Etiología del trastorno

La etiología de los TTM es ignorada, debido a la falta de conocimiento de su origen y los síntomas entorpece comprender su naturaleza. Algunos de los factores que incrementan el riesgo de padecer este tipo de trastornos abarcan los traumatismos, tanto directos como indirectos. Así como factores psicológicos como es el estrés [3], [25].

El estrés se ha vuelto un factor de importancia en el padecimiento de este tipo de patologías, debido a la predisposición de apretar y rechinar los dientes conocido como bruxismo nocturno o diurno. En el bruxismo nocturno se ve afectada la interrupción del sueño reparador siendo este el factor principal en la permanencia del dolor mandibular crónico. Esto incrementa hábitos dañinos y una mala postura [18], [35]. Existen síndromes que afectan los músculos de cara y cuello contribuyendo al desarrollo de la patología como lo es el SLCP [22], [36], [46].

v. Factores de riesgo

Algunos factores que pueden aumentar el riesgo de desarrollar trastornos temporomandibulares [21], [22], [47] son los siguientes:

- Una mala postura en los músculos del cuello y la parte superior de la espalda puede conducir a la tensión del cuello y anomalías de la función muscular de la mandíbula.
- El estrés puede aumentar la tensión muscular y apretar la mandíbula.
- Las mujeres de 18 a 44 años tienen un mayor riesgo.
- Los pacientes con artritis inflamatoria crónica tienen un mayor riesgo.
- El bruxismo crónico, el rechinar o apretar los dientes a largo plazo.
- Ciertas enfermedades del tejido conectivo que causan problemas que pueden afectar la articulación temporomandibular
- Las personas con traumatismo en la mandíbula o dientes mal posicionados tienen un mayor riesgo.
- Las personas que tienen una predisposición genética a la sensibilidad al dolor y al aumento de las respuestas al estrés pueden ser más susceptibles.

C. BIOMECÁNICA Y KINESIOLOGÍA MANDIBULAR

La biomecánica de movimientos realizados por la mandíbula de manera correcta/normal están acompañados de una rotación del cóndilo. Seguida de una traslación del este con el disco entre la mandíbula y la superficie articular temporal.

La ejecución del movimiento de apertura hace que el cóndilo se mueva hacia delante seguido del disco. Sin embargo, el disco al deslizarse más lento tiene un movimiento posterior en relación con el cóndilo [42]. Esto se produce gracias a la contracción muscular de los supra hioideos en los primeros 25 mm del movimiento. Inversamente sucede la relajación de los músculos elevadores la cual hace caer el cóndilo lo que aumenta el espacio articular, generando una apertura mayor a 25 mm. Esto conlleva a una contracción del pterigoideo lateral, moviendo los cóndilos hacia adelante y a su vez mueve el disco en la misma dirección [8], [48], [49].

En el movimiento de protrusión implica la traslación anterior bilateral de ambos cóndilos. Involucrando nuevamente la relajación de los músculos elevadores, aumentando el espacio articular y disminuyendo la compresión articular. Al mismo tiempo la cabeza inferior del pterigoideo externo se contrae para reubicar a los cóndilos hacia delante, y el disco se conduce lentamente por las inserciones colaterales [8], [48], [49].

El movimiento de lateralidades implica un juego de contracción/relajación de los músculos masetero, temporal, pterigoideo medio y lateral de ambos lados de la articulación. Es decir, para realizar una lateralidad izquierda se contraen los músculos pterigoideo medio y lateral, a su vez se relaja los músculos temporal y masetero del lado derecho. Inversamente en el lado izquierdo, el músculo temporal se contrae y se relajan el pterigoideo medio y lateral. Ocurre lo contrario al realizar una lateralidad derecha [8], [48], [49].

Estudiar la dinámica del movimiento de la mandíbula genera la posibilidad de obtener un diagnóstico de los TTM y prevenir el desarrollo de enfermedades del sistema estomatognáticas. En la literatura describen características de los movimientos mandibulares que pueden diferenciar a pacientes con y sin TTM.

En el caso del movimiento de apertura y cierre, la desviación puede ser generado por dos causas. Muscular o ligamentosa que se presentan como alteraciones amplias, inconsistentes y de barrido, que no están asociadas con ruido o chasquido articular. La segunda causa es a consecuencia que el disco este restringido por adherencia y/o morfológicamente alterado, generando una desviación unilateral de tipo "C" o una desviación bilateral de tipo "S" o "Z". Aunado a ello se presenta un chasquido o ruido articular [4], [8].

En el caso patológico, poseer una apertura máxima menor de 35 mm sin asistencia da pauta a una limitación, generada por el desplazamiento anterior del disco en relación

con el cóndilo. Provocando una experiencia dolorosa, sin llegar a la luxación, provocando daño progresivo del cartílago y aumentando las probabilidades para padecer algún TTM [13], [42].

El movimiento del cóndilo no modifica las limitaciones ligamentosas, capsulares y musculares en los movimientos de protrusión y lateralidades, es decir no altera la amplitud durante los movimientos repetitivos. Caso contrario en el movimiento de apertura y cierre que puede llegar a modificarla al aumento repeticiones [13], [15], [16], [50]. Esto abre pauta para analizar los movimientos de protrusión y laterotrusión para ayudar a diferenciar las causas intraarticulares de los problemas musculares.

En cambio, cuando el movimiento de lateralidades presenta un aberrante deslizamiento es resultado de músculos cortos e hipertónicos que impiden su movimiento y la falta de contracción coordinada de los músculos inervados para la ejecución del movimiento, aumentando las probabilidades de padecer un TTM [8].

El uso de nuevas tecnologías para la adquisición y descripción de los movimientos mandibulares ha abierto camino a la búsqueda de nuevos parámetros con la ayuda de la kinesiología. En la literatura plantea a la velocidad del movimiento como un factor importante que modifica características mecánicas de la mandíbula. Asimismo, exponen que el uso de variables geométricas como el área y desplazamiento de los movimientos [8], [51].

Gawriolek *et al.* [51] hace uso de la aceleración del movimiento de apertura y descubre que esta característica es útil para diferenciar a los pacientes con y sin TTM.

D. EQUIPOS UTILIZADOS PARA EL DIAGNÓSTICO DE TTM

El diagnóstico de los TTM se ha basado en la información obtenida a través de la exploración física y de los cuestionarios dentro del DC/TMD, debido a que la articulación está estrechamente relacionada con el sistema auditivo y los tejidos orofaciales, debe de existir un diagnóstico precoz y oportuno para mejorar la calidad de vida del paciente. En la actualidad las técnicas de diagnóstico por imagen han mejorado considerablemente en cuanto a calidad de la imagen como en resolución. Estos equipos de imagen se han utilizado como pruebas complementarias que ayudan a confirmar o poner en duda el diagnóstico emitido previamente. Sin embargo, se llegan a presentar complicaciones en la toma de las imágenes debido a la estructura propia del cóndilo y las estructuras óseas. Siendo esto un problema económico para el bolsillo de los pacientes, puesto que se tendría que hacer la toma de varios estudios de imagenología para una correcta interpretación y aseveración del diagnóstico previamente emitido. El precio de los estudios citados a continuación son el promedio obtenido de los diferentes establecimientos de imagenología en la ciudad de Aguascalientes.

Existen pruebas que pueden ayudar a confirmar o poner en duda el diagnóstico previo establecido. Estos exámenes complementarios permiten obtener información adicional que nos ayudaran a establecer un diagnóstico [30], [45], [52]:

CARACTERÍSTICAS

De acuerdo con la información que se desea obtener, se hará llevar a cabo el examen de imagenología. En la actualidad son utilizados los siguientes exámenes de imagenología

i. Radiología convencional

Las técnicas radiográficas clásicas son difíciles de utilizar debido a las características anatómicas de la zona. Debido a ello para mejorar los resultados los rayos deben dirigirse desde debajo, con el fin de obtener imágenes de perfil de la zona, lo cual permite analizar tejidos duros, la relación del cóndilo y fosas, así como el grafo de movilidad.

ii. Tomografía convencional

Este examen consta de realizar finas secciones para ver las estructuras sin superposiciones. Para obtener diferentes imágenes resulta de más utilidad que la transcraneal para ver la posición del cóndilo o los cambios óseos, y las imágenes obtenidas son auténticas proyecciones laterales.

Entre sus ventajas podemos considerar:

- Mejor identificación de las deformidades y alteraciones óseas.
- Mejor valoración de la posición del cóndilo en la fosa y permite una buena exploración de la movilidad, incluso mejor que la RM.

Entre sus desventajas podemos citar:

- Coste es de entre \$2,000 y \$2,500 pesos mexicanos
- El tiempo de realización
- Exposición elevada a la radiación.

iii. Tomografía computarizada.

Las imágenes tomográficas facilitan la adquisición de información única y valiosa sobre la anatomía, la amplificación de las fracturas y los cambios patológicos, en especial para el examen de regiones anatómicamente complejas, como la ATM. De igual manera se emplea un láser que va polimerizando para conseguir un modelo tridimensional.

Entre sus principales inconvenientes se encuentran:

- El coste está en promedio de \$2,100 pesos mexicanos
- Mayor molestia en el paciente

- Aumento en la irradiación, comparado con la radiografía convencional.

iv. Artrografía

Nos permite obtener una imagen indirecta del disco mediante la inyección de un contraste dentro del compartimento articular superior, inferior o ambos. Mediante esta se puede estudiar la funcionalidad del disco, así como determinar adherencias y obtener una buena información de los tejidos blandos. Así pues, entre sus ventajas podemos citar:

- Ayuda a visualizar tejidos blandos.
- Valorar los movimientos discales y del cóndilo.
- Muy útil para las perforaciones discales.

De sus inconvenientes cabe destacar:

- Precisa formación especial.
- Es invasiva, dolorosa y ocasiona una importante irradiación para el paciente.
- Posibilidad de reacciones alérgicas y de infección.
- Incluso una ATM normal puede presentar un desplazamiento del disco debido a la distensión ocasionada por la técnica.

v. Resonancia Magnética

Es la técnica de elección más común para el diagnóstico funcional y patológico de la ATM, no sólo por la información anatómica y funcional que aporta sino porque es una técnica que evita las radiaciones ionizantes. De acuerdo con Barbieri [53], se le atribuye una especificidad del 96% y una sensibilidad del 98%. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes es el alto costo para la realización de un examen con este equipo, en promedio el costo en el estado de Aguascalientes es de \$4,750.

E. SENSIBILIDAD Y ESPECIFICIDAD

En la actualidad el estándar de oro para el diagnóstico de los Trastornos de la Articulación Temporomandibular son los Criterios de Diagnóstico para Desordenes Temporomandibulares o mejor conocido como *DC/TMD*. Este método tiene una sensibilidad del 70% y especificidad del 95% [54].

F. PRINCIPIO PARA LA MEDICIÓN DE LA ATM

Para un correcto diagnóstico y medición de la articulación temporomandibular se debe llevar a cabo por medio de DC/TMD de Schiffman *et al.* [55], los cuales están disponibles en el Journal of Oral & Facial Pain and Headache, 2014.

El DC/TMD está diseñado para su uso tanto en entornos clínicos como en entornos de investigación aplicados, y consiste en dos ejes. La sensibilidad y especificidad de este protocolo son aceptables para un diagnóstico definitivo. Los criterios de diagnóstico y diagramas de árbol de decisión han permitido mapear las respuestas del historial, así como de los hallazgos clínicos presentados durante la exploración [54]. A continuación, se describe los procedimientos de cada eje:

i. Eje I de la DC/TMD

El cual corresponde a la evaluación clínica, durante este procedimiento el paciente permanece sentado con la espalda apoyada en el respaldo de una silla, la cabeza en una posición natural y los pies en el suelo. Se pregunta al paciente acerca de los síntomas de los TTM a través de un cuestionario. El DC/TMD evalúa los siguientes parámetros:

- Ubicación del dolor y el dolor de cabeza
- Relaciones incisales
- Incisivos horizontales y verticales (mm)
- Patrones de apertura: desviación recta, corregida o no corregida (mm)
- Movimientos de apertura: apertura sin dolor sin asistencia, apertura máxima y apertura asistida (mm)
- Movimientos laterales (mm)
- Movimientos retrusivos y protrusivos (mm)
- Ruidos ATM durante la apertura, cierre, movimientos laterales
- Dolor de los músculos y elementos anatómicos que rodean la ATM por medio de la palpación.

La primera sección del eje está relacionada con el diagnóstico de dolor y las otras dos se concentran en obtener el diagnóstico de trastornos de las articulaciones de la mandíbula [45].

ii. El Eje II de la DC/TMD

Este eje posee instrumentos para evaluar el comportamiento del dolor, el estado psicológico y el funcionamiento psicosocial. La inclusión de la característica bioconductual ha sido bien aceptada en el campo del dolor en general, y la inclusión específica de nuevos instrumentos DC/TMD Eje II se ha recomendado como un modelo general para evaluar cualquier paciente con dolor [55].

En la referencia [55] se dispondrán de los cuestionarios y material utilizados para la evaluación por medio de la DC/TMD, en la parte de anexo se dispondrá del cuestionario.

G. ANTECEDENTES DE USO DE UN SISTEMA DE VISIÓN.

Desde 1914 se han empleado varios métodos de visualización de la ATM para medir los movimientos mandibulares. Las técnicas de medición incluyen dispositivos de medición simples, como una regla milimétrica, a sofisticados dispositivos electrónicos para registrar los movimientos de la mandíbula utilizando imanes o sensores de fotodiodo [58].

Muchos de los métodos de exploración se basan en el uso de instrumentos de grabación que normalmente emplean sensores fijos en la mandíbula, como es el caso del ultrasonido, los acelerómetros, los campos electromagnéticos, la video fluoroscopia, y dispositivos optoelectrónicos. Otros métodos incluyen el trazado de gráficos, imágenes (radiografías laterales), o transductores electromagnéticos cementados en dientes anteriores [21].

Recientemente se ha encontrado la utilización de los sistemas de visión computacional en la ATM. Ya que las complicaciones de un tardío o erróneo diagnóstico de la ATM derivan a múltiples trastornos, y son caracterizadas por dolor [5], [9], [30]. La videofotogrametría se le conoce al proceso de análisis cinemático mediante la aplicación de los sistemas de visión. En esta tesis se hace una propuesta para el estudio de los TTM con base en el seguimiento de movimientos 3D utilizando marcadores de realidad aumentada (marcadores ArUco).

Desde 1979 Salomón *et al.* [59] llevo a cabo una investigación sobre la relación, caracterización y el seguimiento de los movimientos mandibulares. Este estudio es uno de los pioneros en su rama, no obstante, se lleva a cabo con dispositivos médicos radionucleares, ya que la tecnología en fotometría de la época no era tan avanzada. No fue hasta 1997 cuando Joseph Leader y colaboradores [60] realizaron uno de los primeros estudios sobre la caracterización de los movimientos de la articulación y el sonido en pacientes con Trastornos Temporomandibulares. El cual se llevó a cabo por medio de marcadores retroreflectivos, micrófono y una videocámara, mediante el registro de 3 movimientos: apertura y cierre mandibular, lateralidades izquierda y derecha, además de protrusión y retrusión. En el cual descubre que en un 75% de los casos hay un ruido articular durante la ejecución del movimiento de protrusión asociado a Trastorno de la ATM.

En julio de 2019 [65] se realizó la validación de los marcadores ArUco para el análisis de movimientos humanos, en España. De acuerdo con los desplazamientos medidos los cuales eran movimientos estáticos, en donde el sistema de marcadores se desplazaba sobre una guía lineal o con un ángulo. Y aquellos con movimiento, se compararon las medidas angulares en movimiento, teniendo en cuenta la velocidad normal de movimientos humanos (0.5Hz). Estos movimientos proporcionaron un Intervalo de confianza de valores > 0.999 en ambos movimientos, lo que demuestra una relación excelente entre la medición real y la del videofotogrametría. Con ello, nos da apertura a concluir que los marcadores ArUco son una gran herramienta para el

desarrollo de sistemas de análisis de movimientos para aplicaciones clínicas, y en nuestro caso para mediciones faciales.

A mediados de la década pasada, Ramón Fuentes *et al.* [62] hace la determinación de protocolos para el movimiento mandibular utilizando un artículograma electromagnético o también conocido como EMA o Sistema Wave. Sin embargo, durante la recolección de los datos se necesitaron la implementación de 16 sensores para poder medir el movimiento funcional y el límite de estos. La ejecución de los movimientos fue de apertura/cierre, lateralidades y protrusión/retrusión. La captura de estos fue desde diferentes planos de toma. Sin embargo, no menciona cual es el mejor protocolo para la determinación del movimiento funcional y el límite.

En 2017 da Cunha *et al.* [14] realizaron un protocolo de seguimiento tridimensional en tiempo real de los desórdenes temporomandibulares a un total de 40 sujetos distribuidos aleatoriamente entre mujeres y hombres, de edades entre los 22 y 45 años, en el cual propone el seguimiento de 3 principales movimientos: apertura y cierre mandibular, protrusión y retrusión mandibular, además de lateralidades. Esto por medio de un equipo de fotometría y la colocación de 9 marcadores optoelectrónicos reflectivos. Comúnmente utilizados en la industria del cine. Este protocolo consistía en la grabación de pacientes con artralgia articular, mialgia articular y el grupo control, la persona era colocada frente a la cámara y se le pedía que realizaran los movimientos. Notaron que existe una significancia estadística entre los pacientes con artralgia y el grupo control en el movimiento de apertura y cierre respecto al eje Y, mientras que en el grupo con mialgia y el control hubo una diferencia significativa en el movimiento de apertura y cierre con respecto al eje X. En conclusión, los individuos que poseen algún Trastorno de la ATM muestran una mayor desviación o deflexión lateral en los movimientos de apertura y cierre en comparación con el grupo control. Mientras que el grupo de mialgia presenta mayor desviación lateral en el movimiento de protrusión en comparación con los restantes grupos.

En 2019 Rodrigo Mantelatto *et al.* [50], realizaron un protocolo de rehabilitación a un total de 49 mujeres entre los 18 y 40 años, en el cual propone una evaluación cuantitativa para movimientos de apertura y cierre mandibular, además de examinar la postura de la cabeza. Esto por medio de un equipo de fotometría, el cual consistía en la grabación de pacientes con y sin mialgia articular, la persona era colocada a un metro de distancia de la cámara y se le pedía que realizaran ciertos movimientos. Sus resultados son muy alentadores, demostraron que el uso de fotometría es útil para evaluar estos movimientos con un nivel de significancia 0.05, en la cual se obtuvo una correlación entre 0.82 a 0.99 en movimientos de apertura y cierre. Y en un rango de 0.75 a 0.98 en postura de la cabeza.

A principios del año 2020, se dio seguimiento del protocolo realizado por da Cunha, esta ocasión llevada por Calil *et al.* [63] en el cual se lleva a cabo la clasificación cuantitativa de los movimientos mandibulares, generando una subclasificación de

pacientes sanos, con artralgia o mialgia articular. En el cual los resultados fueron superiores al 90%; es decir, la clasificación fue precisa y exacta al momento de discernir entre pacientes sanos, con mialgia o artralgia de la articulación temporomandibular. No obstante, en cuanto a su sensibilidad y especificidad, dependía del movimiento y la característica evaluada. Por lo cual establecen un rango desde 56% a 88%. La clasificación de los movimientos y su diagnóstico fue implementada a un total de 40 individuos por medio de aprendizaje máquina, especialmente un algoritmo de aprendizaje supervisado. Sin embargo, aún no es recomendado como una herramienta de diagnóstico, sino como un auxiliar en el método de exploración de la TMD.

H. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA VISIÓN COMPUTACIONAL

i. Visión Computacional

Los sistemas de visión computacional (SVC) desde su creación hasta la actualidad han tratado de imitar la visión humana. Por ello su utilización ha traído consigo el procesamiento, entendimiento y construcción de dispositivos que sean capaces de mejorar, interpretar y extraer características de una imagen. El principal objetivo de los sistemas de visión computacional es el reconocimiento de objetos, así como su posición en el espacio [64], [65]. Los SVC son una herramienta multidisciplinaria ya que tiene una relación estrecha con la inteligencia artificial y aprendizaje máquina, debido a la gran manipulación, procesamiento, análisis y empleo de algoritmos matemáticos en video e imágenes capturadas. Existen múltiples aplicaciones en diferentes áreas de la industria como: la robótica, manufactura, meteorología, además una de las áreas de aplicación con mayor interés es en medicina [64], [66].

Este sistema calcula la posición 3D de marcadores por medio de la utilización de algoritmos de seguimiento de la librería OpenCV [67], con el cual obtiene la posición 2D de estos marcadores, además de una estimación y profundidad de ellos, inclusive con el uso de una sola cámara.

ii. Calibración del sistema [68]

La calibración de los sistemas de visión es uno de los pasos para una correcta implementación de la medición visual y el posicionamiento de los objetos en la imagen dentro del mundo real. Se deben de considerar algunas dificultades para la obtención de las imágenes, como: el número de disparos (espacio de medición y campos de visión), el número de imágenes de calibración (pocas imágenes generan parámetros inexactos), la apertura y distancia focal no debe de cambiar (si llega a presentarse, hay que volver a calibrar).

En la actualidad el uso de las cámaras para distintos procesos tanto industriales como médicos han hecho que disminuya su precio de adquisición. Sin embargo, para poder utilizar cualquier cámara deben de ser calibrada debido a que no son mecanismos perfectos. Dos de las principales distorsiones son la distorsión radial, la cual hace que las líneas rectas parezcan curvas (Figura 3) y la distorsión tangencial.

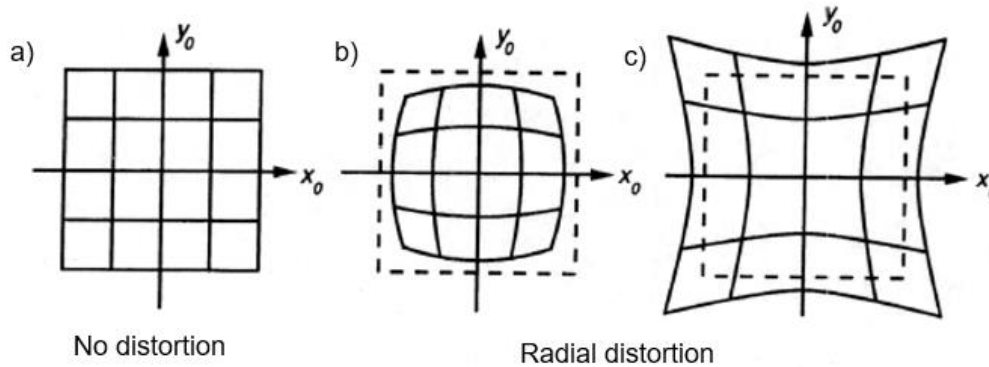


Figura 3 Distorsión radial en la imagen c) se muestra la curvatura de las líneas en comparación con a) y el efecto de este es mayor cuando se aleja del centro de la imagen como podemos observar en b). Además observamos que el borde no es una línea recta y no coincide, además de que todas las líneas son abultadas. En la imagen b) podemos observar la distorsión radial negativa o mejor conocida como barrel distortion, mientras que en la imagen c) es una distorsión radial positiva o también conocida como pincushion distortion. [68]

Esta distorsión se puede modelar de la siguiente manera:

$$x_c = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \tag{1}$$

$$y_c = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \tag{2}$$

Mientras que la distorsión tangencial ocurre cuando la toma de las imágenes no está perfectamente alineada paralelamente al plano de imagen, es decir algunas áreas de la imagen llegan a verse más cercanas de lo esperado. Se resuelve mediante:

$$x_c = x + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \tag{3}$$

$$y_c = y + [p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1 xy] \tag{4}$$

En resumen, se deben encontrar 5 parámetros [68] conocidos como coeficientes de distorsión dados por:

Tabla 1 Coeficientes de distorsión y su expresión matemática.

Nombre	Coefficiente
Coefficiente #1 de distorsión radial	k_1
Coefficiente #2 de distorsión radial	k_2
Coefficiente #1 de distorsión tangencial	p_1
Coefficiente #2 de distorsión tangencial	p_2
Coefficiente #3 de distorsión radial	k_3

Anexo a ello se debe de encontrar los parámetros intrínsecos y extrínsecos de una cámara. Los parámetros intrínsecos son específicos de la cámara como lo son la distancia focal (f_x, f_y) , centros ópticos (C_x, C_y) , etc. También conocidos como matriz de cámara, esta es única para cada cámara, una vez calculada es almacenada en una matriz de 3x3.

$$matriz\ de\ cámara = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

Por otro lado, los parámetros extrínsecos corresponden a los vectores de rotación y traslación los cuales traducen las coordenadas de un punto 3D a un sistema de coordenadas.

Para poder corregir este tipo de distorsiones, utilizamos la técnica de calibración con un patrón de tablero de ajedrez [69], del cual nos interesan puntos específicos como lo son las esquinas cuadradas del tablero. Debemos de conocer sus coordenadas en el mundo real y conocemos sus coordenadas en la imagen, con estos datos se obtienen los coeficientes de distorsión.

Todo este proceso conociendo que la transformación proyectiva sin distorsión dada por el modelo de cámara estenopeica está dada por:

$$sp = A[R|t]P_w \tag{6}$$

donde P_w es un punto 3D expresado en el sistema de coordenadas, p es un píxel 2D de la imagen, A es la matriz intrínseca de la cámara, R y t son la rotación y traslación. Podemos conocer los coeficientes y trasladarlos a la matriz de la cámara, así poder tener imágenes sin efectos de distorsión. En la Figura 4, podemos observar el modelo de cámara estenopeica o mejor conocido como cámara pinhole.

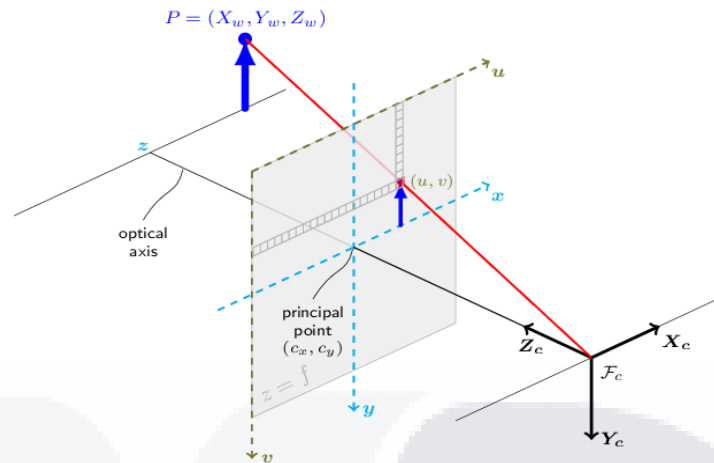


Figura 4 Modelo de cámara estenopeica. Donde (u, v) se refiere a las coordenadas en pixeles de la imagen y $P = (X, Y, Z)$ son los puntos en las coordenadas en el espacio real, es decir las coordenadas en cm respecto a la cámara. Mientras que el centro del sistema de coordenadas esta dado por la colocación de la cámara [68].

iii. Marcadores arUco

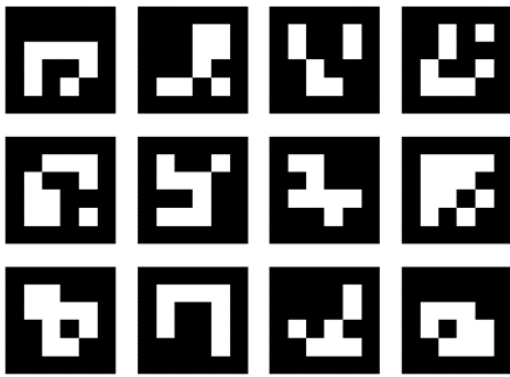


Figura 5 Diccionario 4x4, Marcadores ArUco

Los marcadores ArUco [70], fueron desarrollados originalmente por Rafael Muñoz y Sergio Garrido, basados en OpenCV, los cuales permiten la detección de varios tipos de etiquetas, las cuales son marcadores sintéticos compuestos por un borde negro y una matriz binaria interna que determinan a un identificador. Existen múltiples diccionarios ArUco que agrupan marcadores con distintos identificadores como podemos observar en la

Figura 5. Estos marcadores en la actualidad han servido en múltiples aplicaciones, sobre todo

Realidad Virtual (VR), así como en procesos de navegación robótica. Una gran ventaja de la utilización de dichos marcadores es la efectividad y rapidez con la que se detectan por los SVC. Además de ser aprobados y validados para la medición de movimientos humanos 3D en julio de 2019 [61].

I. CARACTERÍSTICAS DE APRENDIZAJE MÁQUINA

i. Regresión Logística

Normalmente cuando se desea modelar una variable en función de otra se hace uso de la regresión lineal (ecuación 7), utiliza el método de mínimos cuadrados que funciona bastante bien desde el punto de vista aritmético. Sin embargo, cuando la variable a explicar solo puede tomar dos valores, es decir la presencia o no de un

proceso. La utilización de la regresión logística es un buen método por su capacidad de analizar las relaciones de las variables de entrada con la variable de salida. Además, que la utilización que es un método utilizado en proyectos de clasificación.

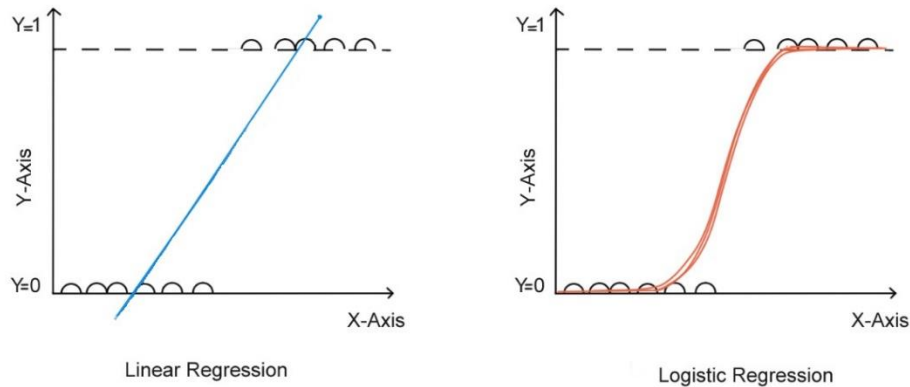


Figura 6 Regresión lineal vs Regresión logística.

Al evaluar la función para valores específicos de las variables independientes se obtendrán cifras que serán diferente de 1 y 0, por ello en este sentido la Regresión Logística se ajusta a dicha situación ya que se basa en el modelo de regresión lineal y la función sigmoidea. Para ello se plantea la función lineal como:

$$g(x) = \omega^T x + b \tag{7}$$

La función sigmoide se define mediante la siguiente ecuación (8) y la regresión logística se define como la ecuación (9):

$$\varphi(j) = \frac{1}{1 + e^{-j}} \tag{8}$$

$$\varphi(x) = \frac{1}{1 + e^{-\omega^T x + b}} \tag{9}$$

La función de costo, que se puede utilizar para medir la calidad del modelo de regresión logística, se define como:

$$J(\omega, b) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (-y \ln a + (1 - y) \ln(1 - a)) \tag{10}$$

Este tipo de regresión lo que pretende es modelar la variable dependiente, en función de una o varias variables independientes.

El uso de la regresión logística como selección de las variables se realiza mediante los coeficientes este es el criterio que proporciona dos objetivos importantes para la selección de las variables:

1. Podemos conocer la fuerza de asociación a través de los OR.
2. Además de confeccionar el valor predictivo del cada variable independiente o bien el modelo en su conjunto.

ii. Eliminación Recursiva de Características (Recursive Features Elimination)

La eliminación recursiva de características o también conocida como RFE, es un algoritmo de selección de características. Además de ser efectivo en seleccionar aquellas características en un conjunto de entrenamiento que son las más relevantes para predecir la variable de destino.

Este método tiene 3 características principales. Un estimador es decir un modelo para ajustar la importancia de la característica, mediante un modelo lineal como lo denota la ecuación (11). El número de funciones para seleccionar y por último el número de características que se elimina en cada iteración.

$$f(x) = \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \dots + \beta_k x_{k,i} \quad (11)$$

El modelo utilizado fue entrenado por el conjunto de entrenamiento usando todas las características. Luego considera los parámetros del modelo $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$ asociado con cada característica los cuales son los que ajustan el modelo y minimizan los residuos; además de dar la importancia a la variable. Elimina el coeficiente menos importante y reconstruye el modelo, esto se repite hasta que deje el número de funciones a seleccionar.

En Python podemos acceder a este método mediante la función RFE [71] previamente mencionada se comprueba si alguno de esos predictores (características) puede ser retirado del modelo sin incrementar el criterio de información. Si se puede, esa variable se saca del modelo, y se analizan de nuevo el resto de las variables. Este proceso se repite hasta que se obtengan el número de características desea obtener, como bien se observa en la Figura 7.

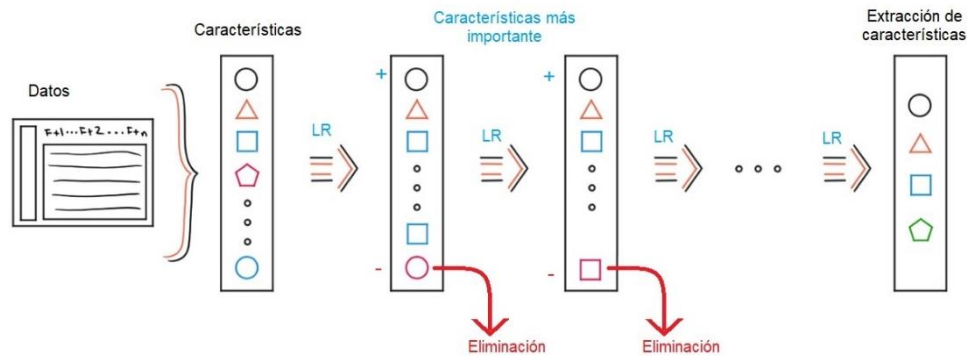


Figura 7 Proceso de eliminación de características recursivas.

En este estudio, el valor de cada atributo se calcula utilizando RFE y las características se clasifican según su importancia por medio de la regresión logística. Los valores de las características obtenidas del clasificador se muestran en la Tabla 17. Para un mejor entendimiento y selección de las características significativas, se realizaron múltiples maneras de clasificar, además que se pretendía identificar las características principales para cada tipo de patología.

Para realizar este apartado se hizo uso de la librería de Python scikit-learn, v1.0.2 [71], mediante el uso de la fórmula `sklearn.feature_selection.RFE()`.

iii. ANOVA y suma de cuadrados tipo II [72]

La técnica de análisis de varianza o también conocida como ANOVA fue desarrollada por Fisher en 1930. Es una gran herramienta para el estudio del efecto de uno o más factores sobre la media de una variable continua. Esta técnica puede utilizarse también para estudiar los posibles efectos de los factores sobre la varianza de una variable. Esta última técnica es de gran ayuda para comprender la asociación de las variables explicativas sobre la variable de respuesta, y es conocida como ANOVA de dos vías o también se le nombra plan factorial con dos factores.

Este método permite ayudar y estudiar como influyen por si solos cada uno de los factores sobre la variable dependiente. Es decir, estudia si la influencia de uno de los factores varía dependiendo de los niveles del otro factor.

Las condiciones para que sea válido este tipo de ANOVA. Es formular la hipótesis como 3 posibles hipótesis nulas. Donde:

1. Las medias de las observaciones agrupadas por un factor son iguales
2. Las medias de las observaciones agrupadas por el otro factor son iguales.
3. No hay interacción entre los factores.

Además de formular las 3 diferentes hipótesis se requiere calcular la suma de cuadrados y cuadrados medios.

Siguiendo el modelo matemático del ANOVA, el cual se resume en la ecuación 12.

$$Y_n = \mu + \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n + \varepsilon_n \tag{12}$$

Donde μ es la media poblacional, un parámetro desconocido a inferir que representa un efecto común, β_1, \dots, β_n son el factor asignable para cada factor que recibe la unidad y ε_n es el efecto donde se confunden las variaciones aleatorias con los posibles efectos de una interacción entre los factores.

Al igual que la ANOVA de una vía, el estadístico el estadístico estudiado por el ANOVA de dos vías es conocido como F_{ratio} , el cual es la razón de cambio entre la varianza de las medias entre los grupos y el promedio de la varianza dentro de los grupos o residual. Sin embargo, esta última se parte para dar cuenta del efecto separado o combinado de los factores independientes. Este estadístico presenta la diferencia significativa de los valore experimentales.

$$F = \frac{s_1^2 / \sigma_1^2}{s_2^2 / \sigma_2^2} \tag{13}$$

Donde s_1^2 es la varianza muestra de tamaño N_1 extraída de la población normal de varianza σ_1^2 y s_2^2 es la varianza de una muestra de tamaño N_2 extraída de una población normal con varianza σ_2^2 . Siempre y cuando ambas muestras sean independientes.

Las diferentes sumas de cuadrados son utilizadas para poder contrastar el efecto de un factor o de una interacción dentro de un modelo, así como encontrar la razón de esa medida relativa sobre un error global, el cual proporciona un valor F o de significancia del efecto. El uso de las sumas de cuadrados de tipo II, es un diseño de factores con interacción, es decir, la diferencia entre las sumas de cuadrados de los residuos de un modelo reducido y el modelo completo. En general, este tipo de suma es la reducción en la suma del error al quitar/añadir otro factor al modelo que contiene todos los factores. Esto podemos entenderlo mejor en la Tabla 2.

Tabla 2 Tabla del resumen de suma de cuadrados tipo II

Término	SS tipo II
x_1	$R(x_1) - R(x_1, x_2, \dots, x_n)$
x_2	$R(x_2) - R(x_1, x_2, \dots, x_n)$
\vdots	
x_n	$R(x_n) - R(x_1, x_2, \dots, x_n)$
x_1, x_2, \dots, x_n	$R(x_1, x_2, \dots, x_n) - R(x_1, x_2, \dots, x_n, x_1x_2 \dots x_n)$

Donde $R(x)$ es la suma de cuadrados de los residuos o del error y RSS es el error del modelo completo

Las ventajas del uso de este tipo de suma son: la invariabilidad respecto al orden de entrada/salida de los factores en el modelo, es apropiada para construir modelos y elección natural de regresión, además de tener una gran potencia cuando no hay interacción.

Para realizar este apartado se hizo uso de la librería de Python stats, v0.13.2 [73], mediante el uso de la fórmula `stats.ols()`. Mientras que para el uso de ANOVA con SS tipo II, se hace uso de la librería stats, v0.13.2 [73], mediante el uso de la fórmula `anova_lm`.

iv. Máquina de soporte vectorial[74], [75]

La Máquina de Soporte Vectorial o mejor conocida como SVM por sus siglas en inglés "Support Vector Machine", es un método de machine learning. Este tipo de método ha ganado gran popularidad como una herramienta para identificación y clasificación de sistemas no lineales. Es un sistema para entrenar máquinas de aprendizaje supervisado tanto que para clasificación como para regresión. Se han encontrado muchas aplicaciones como clasificación de imágenes, reconocimiento de caracteres, detección de proteínas, etc. Esto lo hace mediante un hiperplano que actúa como un límite de decisión entre clases. Debemos de considerar ciertas características para la utilización de este tipo de algoritmos:

1. Al ser un algoritmo de aprendizaje supervisado, deberemos de entrenarlo con datos previamente etiquetados. Se tiene que llevar a cabo esto ya que los datos de entrenamiento sirven para clasificar a los nuevos datos de entrada según lo aprendido en la fase de entrenamiento.
2. Una de las mayores ventajas en el empleo de este tipo de algoritmos es su gran capacidad para manejar problemas de clasificación, así como de regresión. Este último es conocido como Regresor de soporte vectorial (SVR).
3. Otra gran ventaja en su utilización es que se puede utilizar para clasificar datos no lineales mediante el uso de un kernel. Con este kernel transforma los datos a otra dimensión en donde se puede visualizar una clasificación clara de las clases de datos.

Es un método que se ha implementado desde la década de los 2000's, en el área biomédica para la clasificación de tejido de cáncer [76]–[78]. Además, cabe destacar que es un método de clasificación más preciso incluso con un conjunto de datos pequeños y el rendimiento llega a ser mejor que el de otros.

El funcionamiento del algoritmo de clasificación por medio del sistema de visión computacional se plantea realizarse de la siguiente manera:

- ✓ Adquisición del video del paciente durante la ejecución de dos movimientos mandibulares por medio de la cámara y el software propio de la misma.

- ✓ Procesamiento de datos por medio del lenguaje Python (Adquisición de datos), debido a que es un software especializado para el análisis iterativo y posee un lenguaje de programación que puede expresar los diferentes algoritmos matemáticos.
- ✓ Aplicación de Filtros, para eliminación de ruido y poder proceder al procesamiento de datos y obtención de características.
- ✓ Detector de eventos, es capaz de encontrar y separar correctamente el inicio de cada ciclo que ejecute el paciente.
- ✓ Selección de características, de acuerdo con la obtención de datos del procesamiento de imágenes.
- ✓ Análisis de componentes principales.
- ✓ Máquina de soporte vectorial, nos ayuda en la clasificación de los datos, mediante el uso de algoritmos de aprendizaje supervisado.
- ✓ Validación cruzada, esencial para la creación de algoritmos de clasificación de datos.

La utilización de SVM fue la última etapa de la propuesta, es decir una vez procesados, filtrados y con la reducción de dimensionalidad de los datos. Se realizó una partición de los datos con un 80% de ellos como entrenamiento y el restante 20% como datos de prueba.

Es decir, el 80% de los datos se utilizaron para crear y formular el algoritmo de SVM. Mientras el resto de los datos se utilizaron para comprobar y calificar al algoritmo. Todo esto para poder encontrar de forma óptima la clasificación de los diferentes TTM.

Dado los vectores $x_i \in \mathbb{R}^p$, donde $i = 1, 2, \dots, n$, en n clases y un vector $y \in \{1, -1\}^n$, por ello el objetivo es encontrar $\omega \in \mathbb{R}^p$ y $b \in \mathbb{R}$. Tal que la predicción está dada por $\text{sign}(\omega^T \phi(x) + b)$ es correcto para la mayoría de las muestras.

Para abordar el problema se introducen un conjunto de variables reales positivas $\zeta_i, i = 1, \dots, n$, llamadas variables de holgura. Dado por:

$$y_i(\omega^T \phi(x_i) + b) \geq 1 - \zeta_i \tag{14}$$

Debido a estas variables de holgura es capaz de clasificar en separables si la variable toma el valor de 0, si tiene un valor entre 0 y 1 se clasifica como no separables, pero son clasificados correctamente y si el valor de esta es mayor a no cumple con ningún requisito. Por ello deducimos con facilidad que $\sum_{i=1}^n \zeta_i$ permite medir el coste asociado al número de ejemplos no separables.

La función para optimizar debe incluir los errores de clasificación que comete el hiperplano de separación, es decir:

$$f(\omega, \varsigma) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^n \varsigma_i \tag{15}$$

Por tanto, el SVM resuelve el problema primario de optimización dado por:

$$\min_{\omega, b, \varsigma} \frac{1}{2} \omega^T \omega + C \sum_{i=1}^n \varsigma_i \tag{16}$$

Donde $y_i(\omega^T \phi(x_i) + b) \geq 1 - \varsigma_i, \varsigma_i \geq 0, i = 1, \dots, n$. Intuitivamente, se está tratando de maximizar el margen (minimizando $\|\omega\|^2 = \omega^T \omega$), sancionando si llega a clasificarse incorrectamente una muestra o se encuentra entre los límites.

Idealmente, el valor de $y_i(\omega^T \phi(x_i) + b) \geq 1$ para todas las muestras, indicando una predicción perfecta. Debido a que los problemas no son perfectamente separables se permite que algunas muestras estén a distancia. Con ς_i es quien delimita el margen. El término C es el que penaliza y controla la fuerza, actuando como un parámetro de regularización inversa. Debido a ello en cierto modo determinará la calidad del clasificador.

Resolviendo el problema de la optimización, la salida de la función de decisión para una muestra x esta dada por:

$$\sum_{i \in SV} y_i \alpha_i K(x_i, x) + b \tag{17}$$

Para finalizar se suma dicho valor a los vectores de soporte, es decir aquellas muestras que se encuentran dentro del margen, ya que los coeficientes duales α_i son cero para las otras muestras.

La función de costo para medir el modelo fue por medio de la regularización L2 o también conocida como mínimos cuadrados, dada por:

$$C = \lambda \sum_{j=1}^p \beta_j^2 \tag{18}$$

Donde λ es el parámetro que equilibra la cantidad de énfasis dado la minimización de la suma residual de cuadrados frente a la minimización de la suma de cuadrados de los coeficientes y β es el peso de la variable dentro del modelo.

Dado que nuestro problema es de múltiples clasificaciones, utilizamos la estrategia de uno contra el resto o también conocida como uno contra todos. La estrategia consiste en colocar un clasificador por cada clase. Para cada clasificador, la clase se ajusta a las demás. Esto permite una mejor interpretabilidad, dado que cada clase cuenta con uno y solo un clasificador para ella. Es la estrategia más implementada para clasificaciones multiclase.

Debido a las limitaciones computacionales de las máquinas de aprendizaje no pueden ser utilizadas en la mayoría de las aplicaciones del mundo real, ya que su objetivo es encontrar un hiperplano que separe mejor las clases de diferentes puntos de datos, esto implica tener un margen más amplio entre clases.

Por ello la implementación del kernel ofrece una solución alternativa para este problema, es decir la función kernel asignan los datos a un espacio dimensional diferente, con la expectativa de que resulte más fácil separa las clases después de esta transformación. Con esto se simplifican los límites de decisión complejos no lineales. A esto se le conoce como truco del kernel, matemáticamente se traduce como el producto punto en un espacio de atributos.

Existen varios tipos de kernel para su implementación como los mencionados en la Tabla 3 Tipos de kernel implementados en SVM y permitidas en la programación de lenguaje Python, su ecuación como característica durante su implementación.

Tabla 3 Tipos de kernel implementados en SVM y permitidas en la programación de lenguaje Python, su ecuación como característica durante su implementación.

KERNEL	DEFINICIÓN	ECUACIÓN
LINEAL	Cuantifica la similitud de un par de observaciones usando correlación de Pearson. El clasificador obtenido es un Support Vector Classifier	$K(x_i, x_{i'}) = \sum_{j=1}^p x_{ij}x_{i'j}$ <p style="text-align: right;">(19)</p>
RADIAL O RBF	El kernel radial tiene un comportamiento muy local, en el sentido de que solo las observaciones de entrenamiento cercanas a una observación de prueba tendrán efecto sobre su clasificación.	$k(x_i, x_{i'}) = \exp \left(-\gamma \sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{i'j})^2 \right)$ <p style="text-align: right;">(20)</p>
POLINOMICO	De grado d (siendo d>1) permite un límite de decisión mucho más flexible. Cuando la SVM se combina con un kernel no lineal se obtiene un Support Vector Machine	$k(x_i, x_{i'}) = \left(1 + \sum_{j=1}^p x_{ij}x_{i'j} \right)^d$ <p style="text-align: right;">(21)</p>

Se debe considerar que para ejecutar la clasificación con más de dos clases existen diferentes métodos para ello, siendo dos de los más populares:

- Uno contra uno
- Uno contra todos

La utilización del método uno contra todos, se ajusta K SVMs, cada vez se compara una de las k clases (codificada como +1) con el resto de $K - 1$ clases (codificada como -1). Siendo $\beta_{0k}, \beta_{1k}, \beta_{pk}$ los parámetros resultantes del ajuste de un SVM y x^* una observación de la prueba. La observación será asignada a la clase para la que la ecuación 23 sea mayor.

$$\beta_{0k} + \beta_{1k}x_1^* + \dots + \beta_{pk}x_p^* \quad (22)$$

Donde la magnitud de $f(x^*)$ indica lo lejos que esta x^* del hiperplano de separación, mientras más lejos este mayor será el nivel de confianza de que la observación x^* ha sido clasificada correctamente.

Determinando las variables de mayor interés y peso dentro de la clasificación que se estableció mediante la regresión logarítmica, se realizó la creación de un algoritmo de aprendizaje máquina supervisado de tipo máquina de soporte vectorial, ya que es uno de los mejores, debido a la implementación de kernel para un aumento de dimensionalidad en caso de necesitarla.

Con las variables se comenzó al procesamiento de los datos y características, con el fin de simplificar los datos. Probamos 2 tipos de kernel, uno lineal y otro rbf o gaussiano o radial, como se menciona en la Tabla 3 este tipo de kernel son los utilizados como métodos de clasificación. Para una mejor comprensión de los resultados y debido a que existen 2 categorías principales en las que se divide los Trastornos Temporomandibulares más la categoría de Sanos, hicimos diferentes clasificaciones.

Para realizar este apartado se hizo uso de la librería de Python scikit-learn, 1.0.2 [71], ya que soporta el uso de multiclases de acuerdo con el esquema uno contra uno. Sin embargo, también se puede hacer uso del esquema uno contra todos.

v. Rendimiento de los algoritmos de aprendizaje máquina.

Para poder evaluar el rendimiento de la propuesta para clasificación de los TTMs, se tomaron en cuenta 4 valores importantes que deben de considerarse para este tipo de aprendizaje. Se realiza la validación cruzada, por medio de la división de los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba, los cuales se calculan mediante la función auxiliar StratifiedKFold() [71] como lo muestra en la Figura 8. Con ello las medidas de rendimiento informada por la validación cruzada es el promedio de los valores calculados en el bucle.

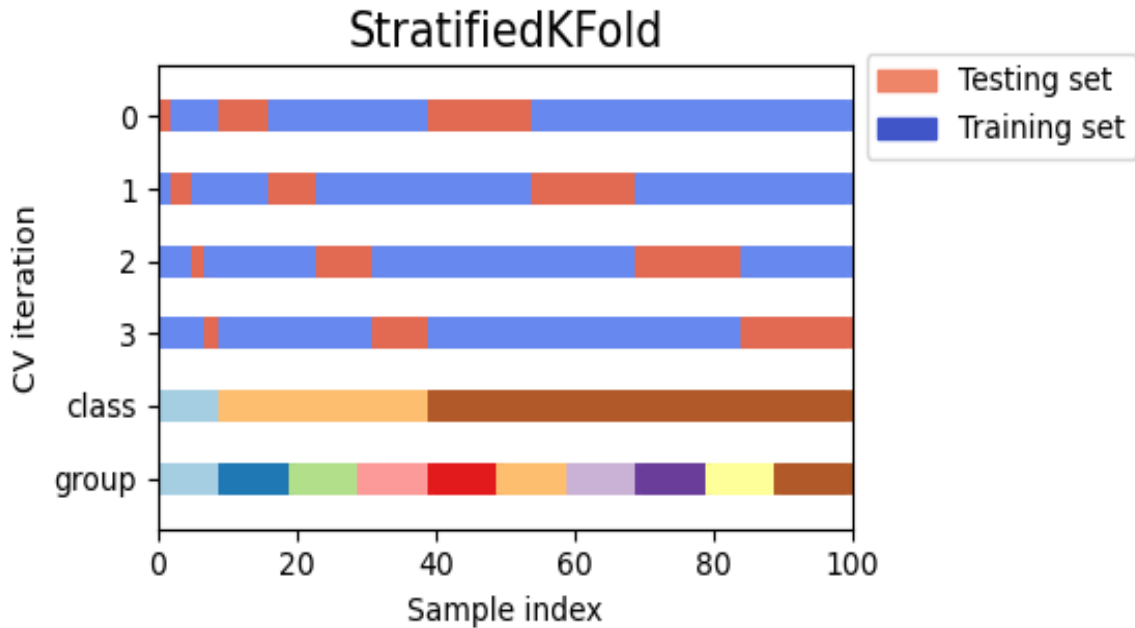


Figura 8 Visualización del comportamiento de validación cruzada por estratificaciones, en la propuesta se realizaron un total de 20 validaciones. Es decir, se llevaron a cabo 20 divisiones de la base de datos. [79]

Una vez terminado el bucle de la función de validación, se realiza el cálculo de los evaluadores del algoritmo, por medio de:

✓ Error de clase:

Indica los elementos identificados erróneamente en la clasificación del total de la muestra o población. También es conocida como Tasa de clasificación errónea. Es decir, que tanto se equivoca el algoritmo para la clasificación de toda la muestra. Se determina a partir de la ecuación.

$$Error\ de\ clase = \frac{(FP + FN)}{(P + N)} \tag{23}$$

✓ Sensibilidad:

Indica la capacidad del clasificador de identificar, los valores positivos que realmente pertenecen a este grupo. Es decir, los pacientes sanos que realmente pertenecen a este Diagnóstico. Se determina a partir de la ecuación.

$$Sensibilidad = \frac{VP}{(VP + VN)} * 100 \tag{24}$$

✓ Especificidad:

Indica la capacidad del clasificador de identificar, los valores negativos que pertenecen a este grupo. Caso contrario a la sensibilidad, esta medida busca

identificar a los pacientes enfermos o con alguna patología que realmente tengan este Diagnóstico. Se determina a partir de la ecuación.

$$\text{Especificidad} = \frac{VN}{(VN + FP)} * 100 \quad (25)$$

✓ AUROC:

Es una métrica de rendimiento para la "discriminación": le informa sobre la capacidad del modelo para discriminar entre casos (ejemplos positivos) y no casos (ejemplos negativos). Se obtiene calculando el TPR (True Positive Rate) y el FPR (False Positive Rate) para diferentes umbrales de decisión entre 1 y 0, donde 1 se clasifica como negativo y 0 se clasifica como positivo. Los cuales se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$TPR = \frac{VP}{(VP + FN)} \quad (26)$$

$$FPR = \frac{FP}{(FP + VN)} \quad (27)$$

Teniendo en cuenta lo expuesto se realizó una investigación con base en los siguientes objetivos:

J. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología con base en el análisis cuantitativo de los movimientos mandibulares, para la clasificación de TTM. Todo esto con el uso de un sistema de visión computacional y marcadores arUco. Para esto, se utilizará el diagnóstico de TTM proporcionado por el instrumento DC/TMD como referencia.

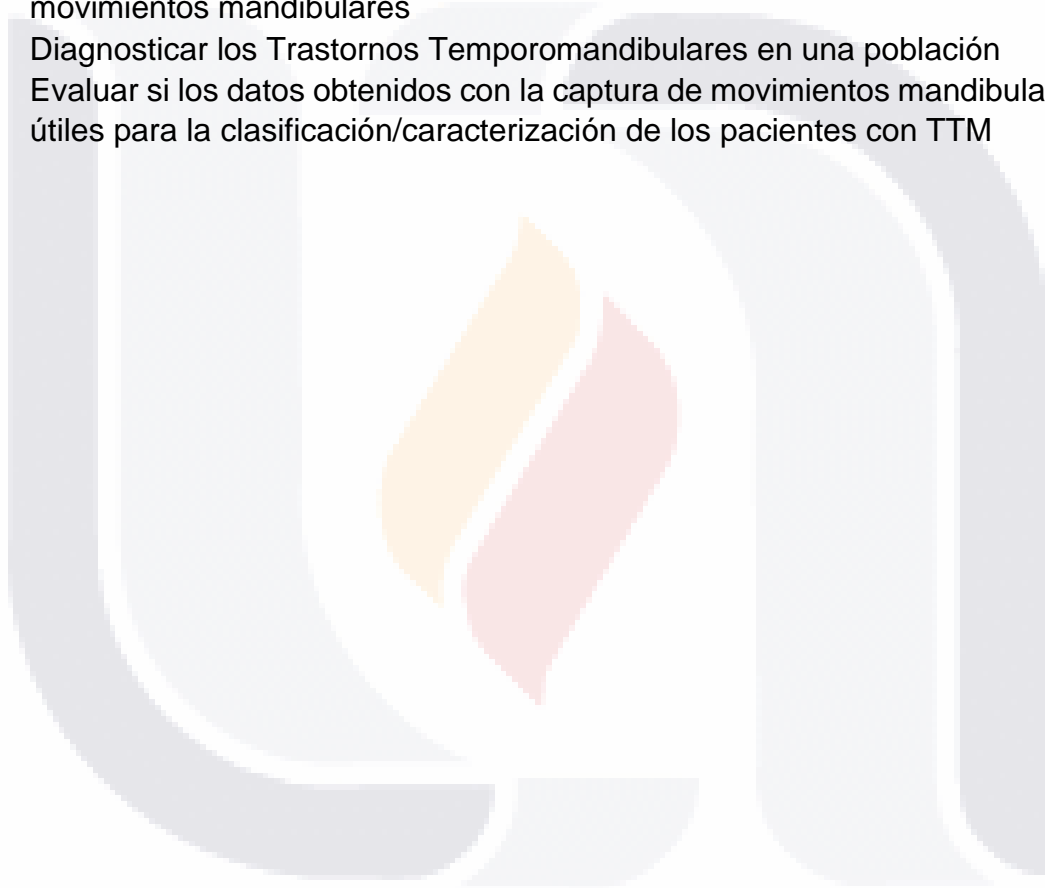
i. *Objetivos Específicos.*

- 1) Definir un protocolo y aplicarlo para la captura de los movimientos mandibulares y localización de los marcadores.
- 2) Identificar marcadores en el espacio 3D mediante un sistema de visión computacional.
- 3) Comprobar mediante la metodología utilizada en la literatura, la caracterización de movimientos masticatorios afectados por la Disfunción Temporomandibular.

- 4) Estimar las posiciones 3D, así como características de movimiento/velocidad/aceleración para caracterizar la Disfunción Temporomandibular
- 5) Desarrollar una propuesta con base en técnicas de aprendizaje máquina para la clasificación de patrones de movimiento mandibular.
- 6) Validación estadística de la propuesta.

ii. Hipótesis

- Desarrollar una propuesta con los datos obtenidos con la captura de movimientos mandibulares
- Diagnosticar los Trastornos Temporomandibulares en una población
- Evaluar si los datos obtenidos con la captura de movimientos mandibulares son útiles para la clasificación/caracterización de los pacientes con TTM



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

En este capítulo abarcara la descripción de los métodos y protocolos utilizados durante el proceso previo a la captura de datos, el protocolo de investigación implementado para la toma de muestras. Se describen de manera sistemática las características resultantes del filtrado para el desarrollo del algoritmo, así como las escalas y unidades utilizadas durante el proceso de medición. Además de la enumeración del equipo con el cual fue efectuado el proceso de adquisición de muestras.

A. TIPO DE ESTUDIO

El estudio realizado es observacional analítico, y transversal por el número de mediciones hechas. Como observamos en las diferentes ilustraciones (Figura 9, Figura 16, Figura 17) el estudio se dividirá en etapas, las mismas que se dedicaran a un proceso del protocolo.

- **Etapas 1:**

Se dedicará a la obtención y calibración de imágenes por medio de cámaras de grado industrial (IDS uEYE).

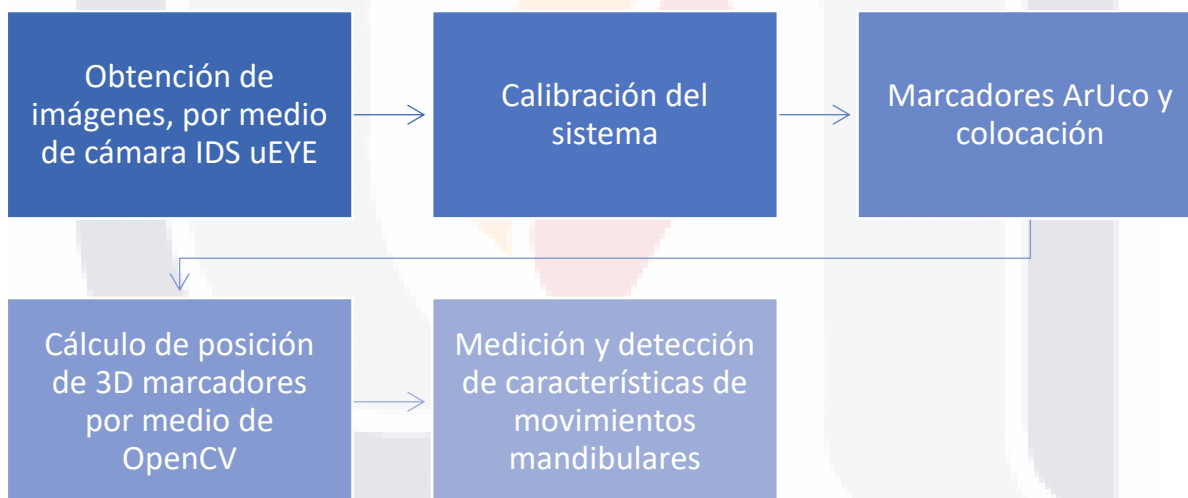


Figura 9 Diagrama de obtención y calibración de cámara

A continuación describiremos en que consistía cada bloque de la etapa.

1. Obtención de imágenes por medio de cámara IDS uEYE:

Se considera el hardware o equipo con el que se trabaje sea aceptado y que cumpla con los requisitos mínimos para la ejecución de la cámara implementada como se describe en la Sección H en la página 54. Se hizo uso del software uEye Cockpit versión 4.94.00 [80] para la captura y grabación de los movimientos mandibulares.

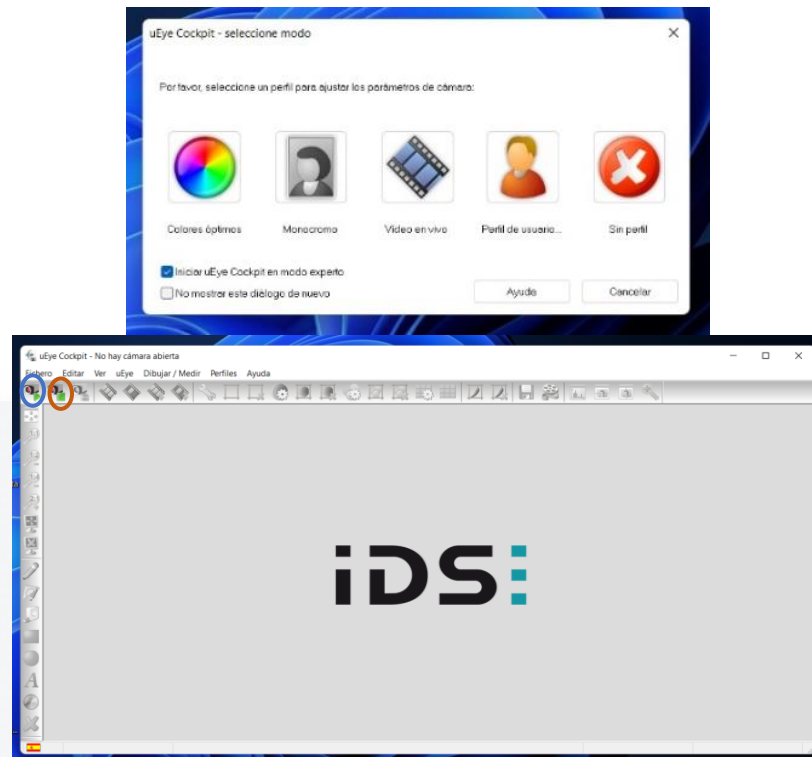


Figura 10 Interfaz del inicio del software uEye Cockpit en la imagen superior, entramos el perfil de colores óptimos siempre iniciando en modo experto. En la imagen inferior se muestra la interfaz para la captura del video de los movimientos, en el círculo azul está el botón de inicio para adquirir de las imágenes de la cámara y en el círculo naranja es el botón de finalizar la toma de imágenes.

2. Calibración del sistema:

Este paso es uno de los más importantes de esto depende la correcta medición visual y el posicionamiento de los marcadores. Los parámetros de calibración están directamente relacionado con la precisión de todo el sistema de visión. El propósito de obtener los parámetros internos y externos de la cámara es corregir y obtener un cuadro con una distorsión lo más pequeña posible. Esto se explica en la Sección H en la página 25.

Para ello se deben de seguir algunos pasos, que se enlistan a continuación:

- a. Preparar la imagen de calibración.

Se hace uso de un tablero de ajedrez en una superficie plana para realizar una correcta calibración. Se obtuvo el tamaño de cada cuadrado del tablero para poder comprender las distancias del mundo real en el SVC. Cada lado del cuadro del tablero utilizado media 30 mm, en la Figura 11 se observa la imagen obtenida mediante el sistema de visión. Se consideró una distancia de 1 metro entre la captura de la imagen y de la cámara, así como el área de captura siempre correspondía a la misma de la grabación del paciente. Se realizó la toma de 10 a 40 imágenes.

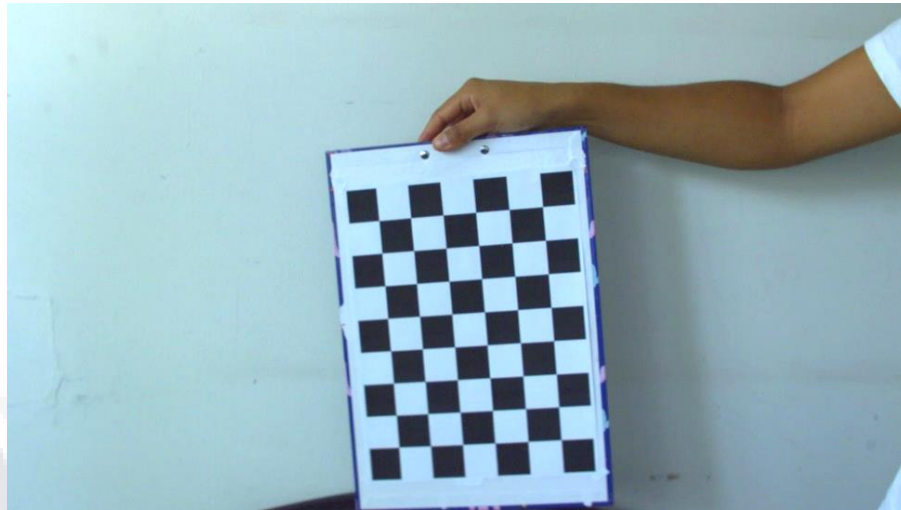


Figura 11 Imagen capturada en el lugar de trabajo para la calibración, así como la utilización de una superficie plana para una correcta calibración.

b. Extraer la información de esquina de cada imagen de calibración

La extracción de la información de esquina depende en gran medida de los coeficientes de distorsión. Es decir, la implementación de un correcto uso del tamaño y mediciones del mismo, aunado a la detección de las esquinas del tablero dentro de la imagen. Permiten detectar la posición y coordenadas de cada esquina del tablero de la imagen en el mundo real. Se realizó este procedimiento mediante `findChessboardCorners`, se aseguró que las imágenes de calibración fueran correctas, mediante la detección precisa de las esquina del tablero utilizando `cornerSubPix` y `drawChessboardCorners`, este ultimo dibuja el patrón y detecta todos los puntos conectados mediante una línea. Este último paso lo podemos observar en la Figura 12, todos los comandos utilizados son por medio de la librería OpenCV.

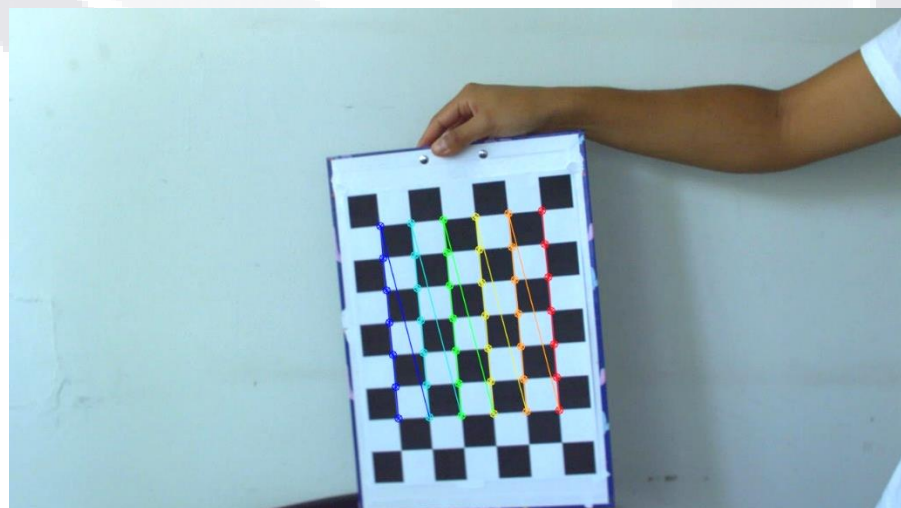


Figura 12 Se observan la detección de todas las placas, es decir que todos los puntos de esquina están conectados y fueron encontrados correctamente.

c. Calibración de cámara.

Una vez con los puntos del objeto en el espacio 3D y los puntos de la imagen 2D listos se utilizó `calibrateCamera`, esta devuelve la matriz de la cámara, coeficientes de distorsión, vectores de rotación y traslación. Producto de sustituciones y operaciones matemáticas previamente vistos.

d. Evaluación de resultados de calibración.

Aunado se evaluó y aseguró que las imágenes no tengan alguna distorsión, por ello se utilizó la función `getOptimalNewCameraMatrix` para optimizar los parámetros internos y los coeficientes de distorsión. La cual devolvió una imagen sin distorsión con píxeles mínimos, inclusive puede llegar a eliminar algunos píxeles de las esquinas o si α es 1 puede agregar píxeles negros, devolvió una imagen que se puede utilizar para recortar el resultado como se muestra en la Figura 13.

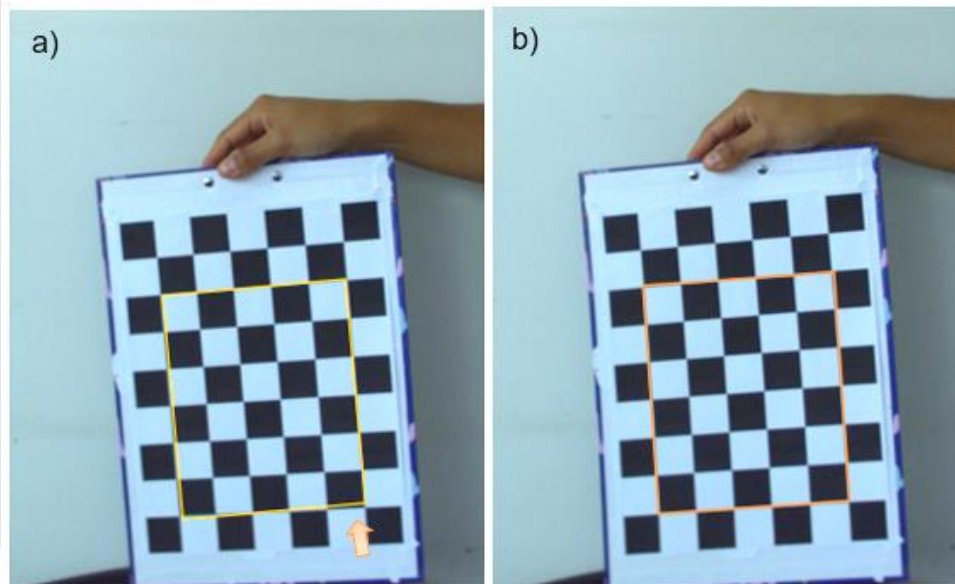


Figura 13 En las imágenes podemos observar la mejora de la distorsión de las imágenes, a pesar de ser casi imperceptible al ojo humano observamos que en figura a) no existe una linealidad entre el rectángulo colocado en color amarillo el cual se señala con la flecha anaranjada. Mientras que en la figura b) se ve un rectángulo visiblemente entre el tablero de ajedrez y el sobrepuesto.

3. Marcadores ArUco y colocación:

La colocación de los marcadores aruco se utilizó mediante una guía craneométrica de los movimientos de los pacientes, así como el patrón de movimiento solicitado al paciente. Para una mejor descripción del proceso se describe a detalle en la Sección G en la página 52

4. Cálculo de posición 3D de marcadores por medio de OpenCV.

Calibrada la cámara y colocados los marcadores en el paciente, el siguiente paso fue detectar los marcadores mediante el sistema de visión computacional. Para ello se cargaron los marcadores del diccionario 4x4 por medio de `cv.aruco.Dictionary_get()`.

Se inicializan los parámetros por medio de `DetectorParameters_create`, si es una detección exitosa se guardan los valores de las coordenadas mediante `markerCorners` y su ID en `markerIds`. Se puede dibujar los ejes de cada marcador por medio de `drawAxis`, así como la medida del mismo. Esto lo podemos observar en la Figura 14 la correcta detección de los marcadores, así como su identificación y orientación de ejes.

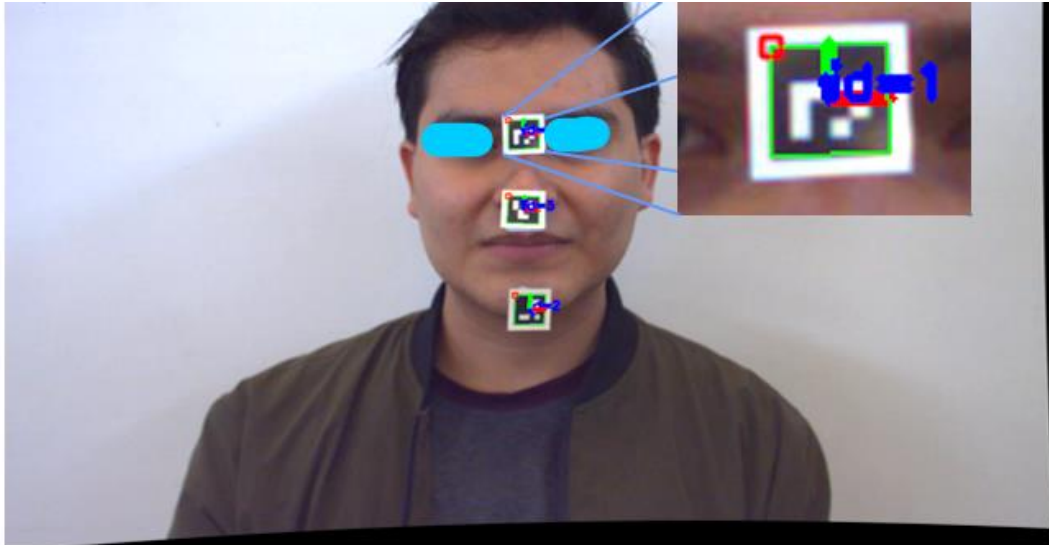


Figura 14 Colocación y detección de los marcadores ArUco en el paciente, su identificación en color azul y la orientación de los ejes de cada marcador independientemente entre ellos.

Al término del procesamiento de cada fotograma del video, las coordenadas de cada marcador se almacenaban en un archivo separado por comas (.csv).

5. Medición y detección de características de movimientos mandibulares:

La medición y la detección de las características se obtuvieron por las coordenadas de los marcadores. Realizamos una separación de movimientos, es decir separamos el movimiento de apertura y cierre del movimiento de lateralidades como se observa en la Figura 15.

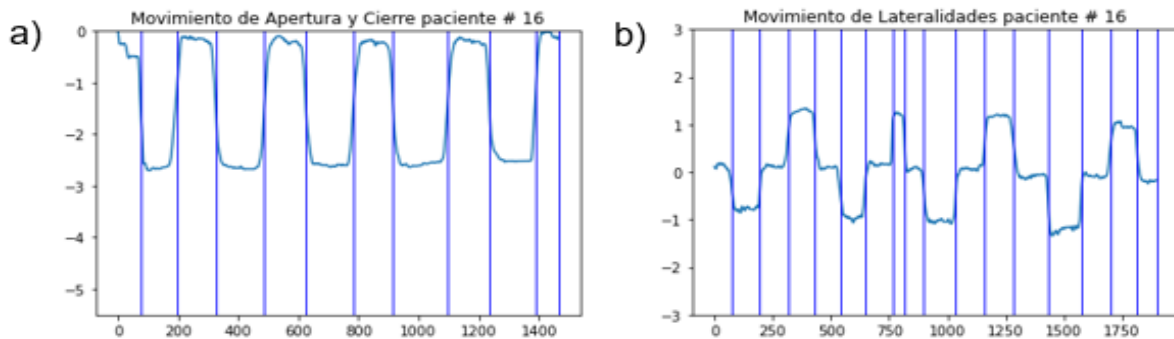


Figura 15 Separación de los movimientos apertura y cierre en la figura a), mientras que en la figura b) observamos el movimiento de lateralidades.

- **Etapa 2:**

Estudio de validación de parámetros (Observacional, Transversal, Analítico)

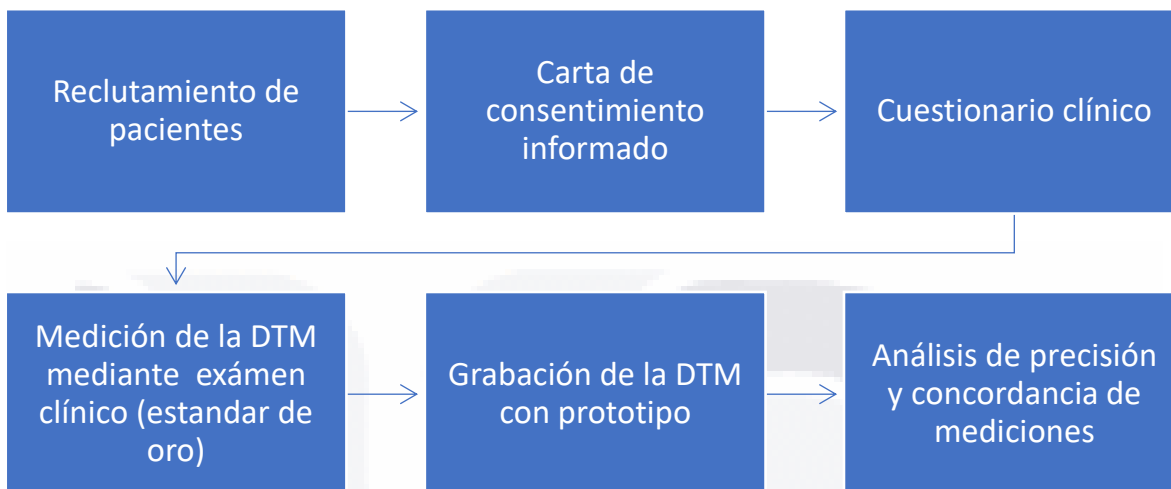


Figura 16 Diagrama de implementación de protocolo y validación de parámetros

Los pasos del diagrama previo están descritos en los subíndices del F al G del presente capítulo.

- **Etapa 3:**

Se dedicará al desarrollo del algoritmo, de acuerdo con lo obtenido en la etapa 1 y 2.

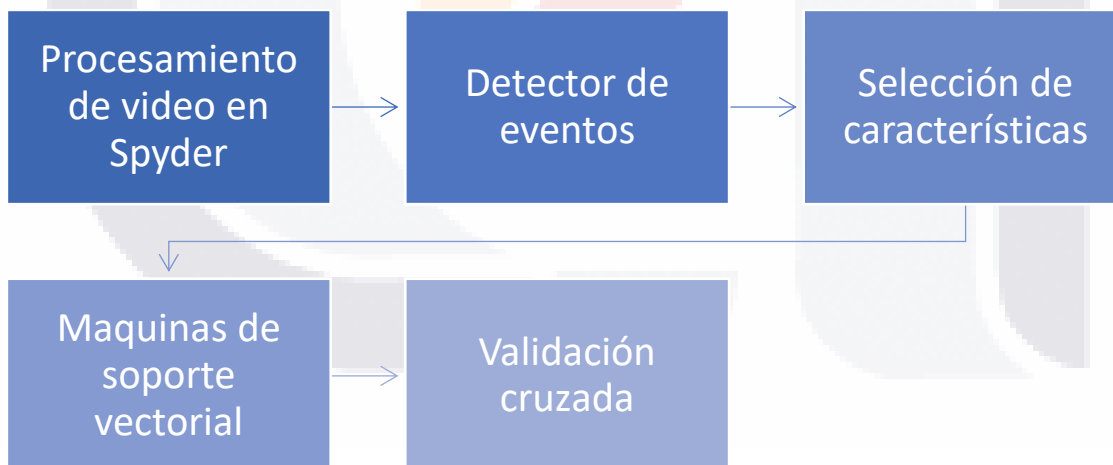


Figura 17 Diagrama de desarrollo de algoritmo

Dentro de los apartados de este diagrama están descritos dentro de la Sección 5 en la página 55.

B. UNIVERSO DE TRABAJO

Personal académico y estudiantes de la Unidad Médico Didáctica, en el Centro de Ciencias de la Salud y Centro de Ciencias de la Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Aguascalientes (Aguascalientes, México).

C. MUESTRA

El tamaño de muestra fue no probabilístico por conveniencia, debido a la contingencia sanitaria por COVID-19, la muestra fue de 116 pacientes. Los pacientes de la muestra cumplieron con un procedimiento de selección y fueron aptos para el estudio. Además, se estimó el número como idóneo para determinar el objetivo del protocolo.

D. SELECCIÓN Y/O ASIGNACIÓN DE PARTICIPANTES O UNIDADES DE OBSERVACIÓN.

Los participantes se eligieron por medio de los criterios de selección mencionados en el siguiente apartado. Cumpliendo los lineamientos para su participación en las pruebas se les informó sobre el protocolo y anexo a ello se les proporcionó un consentimiento informado, el cual firmaron. Los participantes fueron personal académico y estudiantes de la Unidad de Estomatología, de Ingeniería en Energías Renovables e Ingeniería Biomédica, dentro de la Unidad Médico Didáctica y en el laboratorio de Ingeniería Biomédica respectivamente, en el Centro de Ciencias de la Salud y Centro de Ciencias de la Ingeniería en la Benemérita Universidad Autónoma de Aguascalientes.

i. Criterios de selección (inclusión, exclusión y eliminación)

A continuación, se muestran los criterios que se usaran para la selección de pacientes participantes en la etapa de validación de parámetros.

ii. Criterios de inclusión

- ✓ Pacientes con edad entre 18 y 60 años
- ✓ Pacientes con antecedentes de patología o síndrome que involucre alguna alteración en forma y tamaño de los huesos faciales.

iii. Criterios de no inclusión

- × Pacientes con trastornos similares a la acatisia o que se dificulte permanecer inmóvil o sentado.
- × Enfermedades reumáticas sistémicas, neurológicas/neuropáticas o inmunes/autoinmunes o dolor de propagación amplia. (Excepción: participantes con documentación médica de artritis reumatoide o fibromialgia).
- × Procesos patológicos encontrados en imágenes como neoplasia (Excepción: Desplazamientos de disco y osteoartritis/osteoartrosis)
- × Radioterapia en la cabeza y el cuello.

- × Cirugía de ATM.
- × Traumatismo en la mandíbula en los últimos 2 meses (exclusión independientemente del tiempo: traumatismo en la mandíbula por accidente automovilístico).
- × Presencia de trastornos del dolor orofacial no TTM.
- × No poder participar debido a la barrera del lenguaje o la incompetencia mental/intelectual.
- × Uso de analgésicos narcóticos, relajantes musculares o terapia con esteroides a menos que se suspenda durante 1 semana antes del examen.
- × Uso de medicamentos antidepresivos a menos que el participante haya estado en una dosis estable durante 60 días.
- × Uso de medicamentos antiinflamatorios recetados o de venta libre no esteroideos a menos que los medicamentos se suspendieran durante 3 días antes del examen.
- × Abuso de drogas recreativas.
- × Pacientes con prótesis dentales totales.
- × Incapaz o no dispuesto a dar el consentimiento informado.
- × Mujeres embarazadas que cursen por el tercer trimestre de gestación.

iv. Criterios de eliminación

- ⊗ Pacientes que decidan retirarse del estudio.
- ⊗ Pacientes que no cuenten con la evaluación clínica mediante DC/TMD.
- ⊗ Videos que no detecte el marcador.
- ⊗ Videos con detección de marcadores menor a 2700 tomas
- ⊗ Videos con cuadros por segundo (fps) menor a 45

E. VARIABLES (INDEPENDIENTE, DEPENDIENTE Y DE CONTROL)

Tabla 4 Variables del estudio

Variable	Definición	Dimensión	Concepto de dimensión	Tipo de variable	Escala de medición	Unidad de medida
Sexo	Conjunto de las peculiaridades que caracterizan los individuos de una especie	N/A	N/A	Independiente Cualitativa	Nominal	Masculino y Femenino
Edad	Tiempo transcurrido a partir del nacimiento de un individuo	Años cumplidos de pacientes	Personas mayores o igual a 18 hasta 80 años	Independiente Cuantitativa Discreta	Intervalo	Años cumplidos
Clasificación de DTM	Hacen referencia a las alteraciones propias de la ATM. Por medio del DC/TMD	N/A	N/A	Control Independiente Cualitativa Descriptiva	Nominal	Artralgia Mialgia Sano
Características sobre lateralidades	Desviación media sobre el eje X de los 5 movimientos ejecutados	Distancia	Distancia media registrada durante cada movimiento entre el total de movimientos	Dependiente Cuantitativa Continua	Razón	Centímetros
Características sobre lateralidades	Área de lateralidad entre el segundo movimiento y el penúltimo movimiento sobre el eje X durante movimiento	Área	Cociente del área del penúltimo movimiento entre el segundo movimiento registrado	Dependiente Cuantitativa Continua	Razón	Centímetros al cuadrado
Características sobre lateralidades	Aceleración promedio sobre el eje X de los 4 movimientos	Aceleración	Relación de apertura respecto al tiempo transcurrido	Dependiente Cuantitativa Continua	Intervalo	Centímetros al cuadrado Segundos
Presencia de dolor	Presencia o ausencia de dolor al momento de ejecutar lo movimientos	N/A	Dolor a la palpación o la ejecución los movimientos de apertura/cierre y lateralidades	Dependiente Cualitativa Descriptiva	Nominal	Si No
Ruido o chasquido articular	Presencia o ausencia de ruido articular durante la ejecución de los movimientos	N/A	Presencia del ruido articular que sea percibido por el paciente cuando se realiza los movimientos de apertura/cierre y lateralidades	Dependiente Cualitativa Descriptiva	Nominal	SI No

F. ESCALAS DE MEDICIÓN Y UNIDADES DE MEDICIÓN VARIABLES

i. Escalas de medición:

1. Evaluación DC/TMD[8]

Dependiendo del ejercicio que se implemente de la examinación física, la escala cambiara de acuerdo con el movimiento.

A. Rango Activo de Moción (AROM)

Por lo general, las mediciones de la apertura y lateralidades son de sencillo procedimiento para su obtención. En contraste las mediciones de protrusión y retrusión son más críticas debido al montaje profesional de los aparatos.

La escala de medición se dará de la siguiente manera:

Tabla 5 Escala normal para los distintos ejercicios

Movimiento	Normal
Apertura	40-55 mm
Protrusión	6-12 mm
Retrusión	1-3 mm
Lateralidades	8-12 mm

Debemos de considerar que el trismo se define como una limitación en la apertura de 20-30 mm tomado como Normal, moderado como 10-20 mm, y grave como menos de 10mm.

B. Movimiento con/sin dolor.

La medición por medio de la palpación en los músculos y estructuras anatómicas de la ATM se da por medio de respuestas de SI/NO. Las preguntas abarcan si hay presencia del dolor, si es familiar el dolor, en caso de tener dolor; si el dolor se extiende a alguna otra estructura de la cabeza o cuello; en el caso de presentar dolor en el musculo temporal se cuestiona si el dolor es similar al que se padece cuando hay migraña o cefaleas.

2. Sistema de visión computacional

En el caso del Sistema de Visión Computacional, se extiende en el mismo rango activo de moción que el DC/TMD.

ii. Unidades de medición:

1. Evaluación DC/TMD

Las mediciones que se lleven a cabo por medio de la evaluación AROM la unidad de medición será los milímetros (mm). Mientras que en el caso de movimiento con/sin dolor, las respuestas serán de SI/NO.

2. Sistema de análisis cuantitativo por visión

Las unidades de medida utilizadas en este sistema para las posiciones serán desviación (mm), área (mm²), velocidad (mm/s), tiempo (segundos), aceleración (mm/s²)

G. TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

i. Protocolo de proceso de reclutamiento de pacientes

En los siguientes párrafos enumerados se extenderá y explicará la logística y realización del reclutamiento de pacientes:

1. Se extendió una invitación a los alumnos de la carrera de Estomatología, Energías Renovables y Biomédica, que acudió a la Universidad Autónoma de Aguascalientes.
2. Durante la invitación al proyecto se les explicó el beneficio, una breve definición y el tiempo que duraba el procedimiento de la aplicación del diagnóstico, se le mencionó el lugar donde se llevaría a cabo el estudio.
3. Si decidía participar se le dio a conocer el consentimiento informado para que lo leyera, se le proporcionó tiempo para que hiciera los cuestionamientos pertinentes; si llegaba a presentar dudas se les resolvió una vez que terminara la lectura de este documento.
4. Posterior a ello se aplicó un pequeño cuestionario para conocer si existía algún criterio de no inclusión que cumpliera. En caso de que presentara algún criterio de no inclusión se le explicó y se le agradeció su participación.
5. Después de esto, se procedió a la firma del consentimiento; en dado caso que no haya firmado o no cumpliera con todos los requisitos se dio por terminada su participación.
6. Una vez firmado el convenio se le explicó los movimientos que debía realizar para una correcta adquisición de datos cuantitativos por el SVC. Entendido la serie de movimientos que se ejecutaron, se realizó la toma del video el cual tuvo una duración aproximada de 2 minutos.
7. Terminada la toma del video se realizó el diagnóstico con el instrumento DC/TMD, el tiempo de duración fue en promedio de 15 minutos. Además, se le dieron los resultados de su diagnóstico una vez terminado este.
8. Con este último paso se dio por terminada la participación en el proyecto de la alternativa de diagnóstico para alteraciones de la articulación temporomandibular

ii. Adquisición de datos cuantitativas por Sistema de visión

En un comienzo se realizó una prueba piloto que se llevó a cabo a 10 participantes, los cuales eran estudiantes y profesores del Laboratorio de Diagnóstico Molecular y Biomateriales de la Unidad Médica Didáctica en la Benemérita Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Esta prueba piloto nos ayudó a la estandarización e implementación del método de adquisición del video y características del paciente. Se realizó mediante la colocación de tres marcadores arUco. La posición de los marcadores fue de acuerdo con los utilizados en la craneometría [50], [81]–[83] como se observa en la Figura 18:

- Marcador 1: punto craneométrico medio de referencia Nasal o Nasión
- Marcador 2: punto craneométrico medio de referencia Nasoespinal
- Marcador 3: punto craneométrico medio de referencia Gnación

Los movimientos solicitados para la adquisición de datos de la articulación fueron: apertura, cierre, y desviación lateral hacia la izquierda y derecha (lateralidades) de la mandíbula.

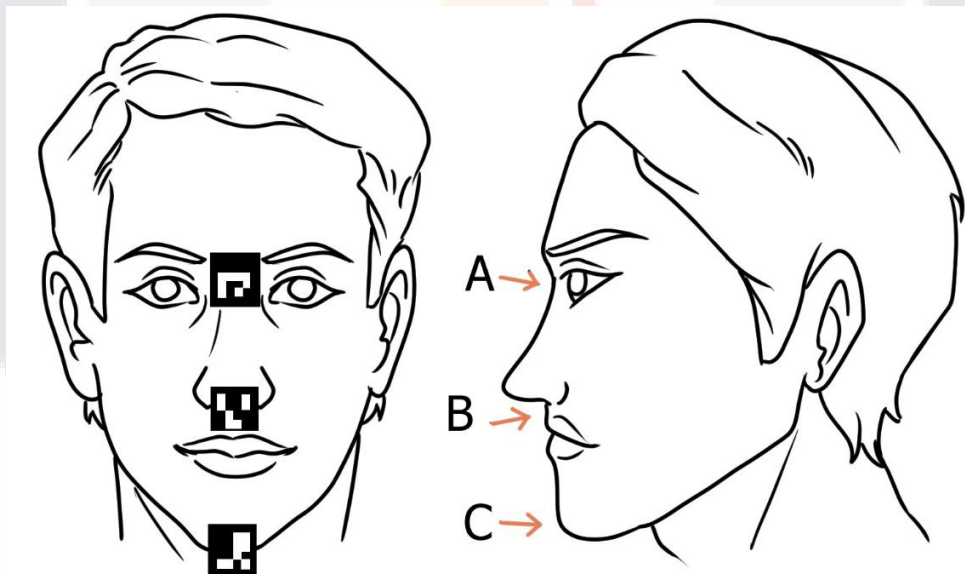


Figura 18 Colocación de marcadores arUco en el paciente para el seguimiento de los movimientos y adquisición de estos por el sistema de visión computacional. El marcador #1, es colocado en el punto a o Nasal, el marcador #3 se posiciona en el punto B o Nasoespinal y por último el marcador #2 es colocado sobre el punto C o Gnación. La numerología de marcador es el dado por el diccionario arUco 4x4.

A cada paciente se le pidió que mantuviera una posición Fowler elevada, es decir, que permaneciera sentado con la espalda recta, apoyada en su totalidad sobre el respaldo del asiento, con los muslos horizontales, con los pies apoyados sobre el piso y la cabeza recta manteniendo la vista hacia el horizonte. Justo enfrente del paciente a una distancia de 80 a 90 cm se colocó la cámara, y con un fondo blanco, el cual permitió una correcta visualización de marcadores. Como referencia se tuvo

una distancia de 110 cm desde el centro de la cámara hasta la pared detrás del respaldo de la silla en la que se encontraba el paciente (Figura 19), colocando siempre la cara al centro de la imagen para reducir la distorsión de los lentes de la cámara.

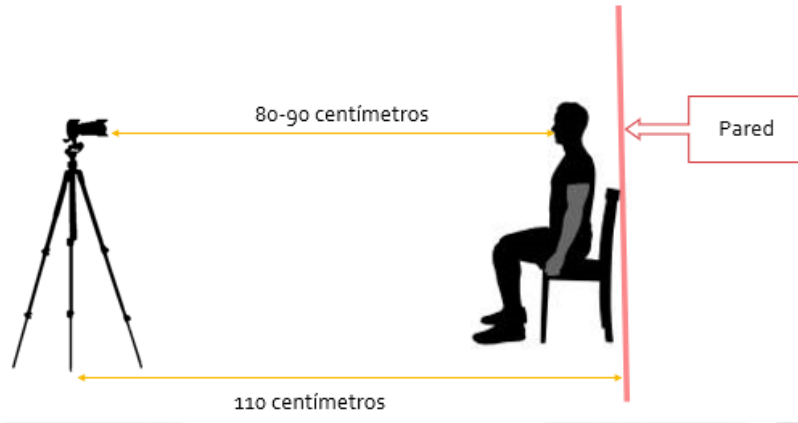


Figura 19 Colocación de cámara y paciente.

Los movimientos de apertura y lateralidades se llevaron a cabo utilizando la técnica descrita en estudios previos [9], [58], [84], cabe mencionar que en el movimiento de lateralidades se realizaron teniendo en cuenta la guía canina. Los movimientos se describen a continuación:

- Durante el movimiento de apertura el paciente realizó 5 ciclos de apertura y cierre de 4 segundos. Consistió en 2 segundos con la boca cerrada luego abrir y mantener por 2 segundos la mandíbula abierta, para finalmente regresar a la posición de inicio con ello concluyó un ciclo. La apertura se realizó a la máxima distancia de apertura que el paciente pudo realizar cómodamente, de igual manera se llevó a cabo el movimiento de cierre.
- Durante los movimientos de lateralidades el paciente realizó 4 ciclos de 6 segundos. Cada ciclo consistió en 2 segundos con la boca cerrada, Posteriormente el paciente movió su mandíbula hacia su lateral derecho y lo mantuvo por dos segundos, terminado el tiempo se le pidió al paciente que regresará a la posición de reposo donde mantuvo dicha posición durante dos segundos más. Seguido se le pidió que desplazara su mandíbula hacia su lateral izquierdo por dos segundos más para finalmente regresar a la posición de inicio y finalizar el ciclo

Una vez que el paciente lleve a cabo las repeticiones de los movimientos solicitados, se sometió al procesamiento de imagen descrito previamente en las etapas del prototipo.

iii. Adquisición de datos cuantitativas por evaluación DC/TMD

La adquisición de datos durante la aplicación de la examinación física se llevará a cabo por medio de la técnica descrita en los criterios de diagnóstico para Desordenes Temporomandibulares encontrados en referencia [55], el cual hará uso de:

- Profesional capacitado en la evaluación de DC/TMD. Nos asistieron 3 pasantes de Estomatología del centro de investigación del mismo departamento de Estomatología del Centro de Ciencias de la Salud de la Benemérita Universidad Autónoma de Aguascalientes. Para poder apoyarnos tomaron la capacitación sobre el uso y manejo del instrumento DC/TMD, impartido por la Universidad de Costa Rica.
- Regla milimétrica de uso quirúrgico.
- Guantes estériles y guantes no estériles desechables.
- Desinfectante para la regla.

H. EQUIPO IMPLEMENTADO PARA LA ADQUISICIÓN POR MEDIO DEL SISTEMA DE VISIÓN COMPUTACIONAL

i. Estación de trabajo (Equipo de cómputo)

Para esto es necesario la instalación de varios Software que se mencionan a continuación: uEye Cockpit de la marca IDS, Spyder (anaconda3) y librerías para el manejo del video y datos, cada una de ellas tiene una función específica en la interfaz gráfica del sistema. En el caso de Spyder nos permite compilar las librerías de OpenCV para utilizarlas y extraer los movimientos del paciente, así como las características.

El equipo utilizado para el desarrollo del proyecto fue:

- Sistema de visión computacional:
 - Cámara IDS uEYE Modelo UI-5240CP.
 - Marcadores ArUco.
 - Estación de trabajo.
- Estación de trabajo
 - Equipo de cómputo, con un procesador Intel Core i7 de 2.6GHz, 250GB de espacio libre y 8GB de memoria RAM
 - Software uEye Cockpit ver. 4.94.00 para la adquisición del video
 - Software Spyder (anaconda 3) ver. 3.8.5
 - Librerías OpenCV ver. 4.4.0

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

En este capítulo se menciona la exploración inicial de las variables, los métodos empleados para la eliminación y filtrado de los datos redundantes o inclusive de datos que no cumplieran con las características requeridas para el desarrollo del algoritmo. Todo se llevó a cabo por medio de fases y etapas como la estandarización de los datos, la corrección de la línea basal, la detección de puntos atípicos y la selección de características. Esta última etapa se tomó de acuerdo con la experiencia, es decir, aquellas características propias y relevantes determinadas por los movimientos del paciente.

Durante la adquisición de los datos se tuvo en cuenta el manejo y procesamiento de los movimientos. La clasificación se realizó con base a los 2 principales TTM, asignando etiquetas de Artralgia, Mialgia y sanos para los sujetos de prueba. En un comienzo se realizó una prueba piloto que se llevó a cabo a 10 participantes, la cual nos ayudó en la obtención de características iniciales.

A. EXPLORACIÓN INICIAL DE VARIABLES

En un comienzo la exploración inicial tiene como objetivo limpiar, ver la distribución de los datos, así como descartar aquellos datos que sean redundantes. Esto para una correcta adquisición de características en la implementación del algoritmo. A continuación, se mencionan los pasos principales:

i. Filtrado de puntos atípicos

Realizamos un filtrado inicial de los valores iniciales para la determinación de las variables, por medio de un kernel de normalización. Consistió en un filtro promedio de 5 valores, como se observa en la fórmula (28). Se discriminaron valores atípicos que pueden proporcionar un sesgo en el procesamiento de los datos.

$$nom = \left[\frac{1}{5}, \frac{1}{5}, \frac{1}{5}, \frac{1}{5}, \frac{1}{5} \right]$$

(28)

ii. Corrección de línea base

Debido a que la adquisición de los datos es en un plano 3D, la línea base en muchas ocasiones se ve alterada por la influencia de diversos factores en la toma de datos o incluso por la referencia de origen del plano 3D en nuestro esquema propuesto. El error es conocido como una señal de baja frecuencia, el cual tiende a introducir error en la medición de los picos, en especial cuando existen picos de baja altura. En el lenguaje Python, se hace uso de la función *detrend* [80], la cual resta la media

o una línea mejor ajustada (en el sentido de mínimos cuadrados) de los datos, con la finalidad de tener una línea basal igual a 0.

$$\hat{x}_t = a_1 + a_2 t + u_t \quad (29)$$

$$\tilde{x}_t = x_t - \hat{x}_t \quad (30)$$

Donde a_1 es una constante, a_2 es el cambio de promedio de un periodo al siguiente, t es el valor de la unidad de tiempo y u_t es el término de error. Dado como resultado la señal filtrada \tilde{x}_t

iii. Estandarización de los datos

En el proyecto en particular es necesario llevar a cabo la estandarización de los datos ya que el objetivo principal es realizar comparaciones entre sujetos de prueba con diferentes características y buscamos una evaluación justa. Es un paso fundamental en el proceso ya que reduce las diferencias inherentes. Se realiza obteniendo la resta de cada valor de la matriz y la media de cada columna entre la varianza de los datos, la media se obtiene por medio de:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^N (x_i)}{N} \quad (31)$$

Donde x_i es cada uno de los valores de una sola característica. Se obtiene la media de cada una de las características y se crea el vector \bar{X} donde c_{1p} representa el promedio de cada característica:

$$\bar{X} = [c_{1p}, c_{2p}, c_{3p}, \dots, c_{np}] \quad (32)$$

De igual manera se emplea la ecuación de la varianza la cual se consigue por medio de la ecuación:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^2}{N - 1} \quad (33)$$

Siendo (X_1, X_2, \dots, X_N) es cada uno de los valores de una característica y \bar{x} la media de todos los valores. Vamos a crear un vector donde contenga los valores de la varianza y se definirá como s_x^2 :

$$s_x^2 = [var_{1p}, var_{2p}, var_{3p}, \dots, var_{np}] \quad (34)$$

Con los datos anteriores se obtiene su estandarización mediante la ecuación:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{X}}{s_x^2} \quad (35)$$

Donde x_i es el vector que contiene los valores de un paciente, al cual se le resta la media de cada característica obtenida en \bar{X} y se divide entre la varianza S_x^2 .

iv. *Detección de puntos atípicos*

Para un correcto procesamiento de información en la creación del algoritmo de clasificación, se descartaron datos de pacientes que no cumplían con los requisitos mínimos para su implementación en dicho algoritmo. En un principio se descartó el paciente 72, ya que no cumple con los requisitos mínimos para el procesamiento, según los criterios de eliminación, ya que se tuvo errores en la captura, puesto que se grabaron alrededor de 27 cuadros por segundo. Los datos del paciente descartado y el motivo por el cual se descartó pueden ser apreciados en la Figura 20.

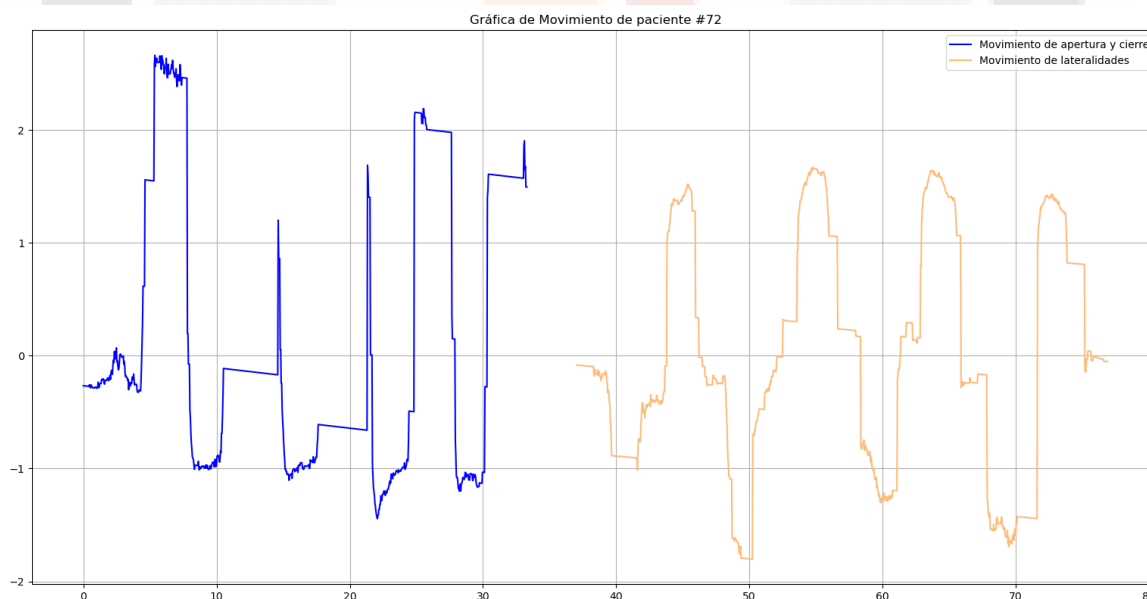


Figura 20 Adquisición del marcador #2 durante ambos movimientos, podemos observar los datos incompletos en la captura y seguimiento del marcador, debido errores en la detección de los marcadores ArUco.

Los pacientes número 2, 12 y 90 se eliminaron de la base de datos debido a que no completaron el total de movimientos correspondientes a apertura y cierre, es decir de 5 movimientos requeridos para una correcta ejecución, únicamente realizaron 4 movimientos. A continuación, presentamos las gráficas correspondientes al

movimiento correcto y a los implementados por los pacientes 2, 12 y 90 respectivamente.

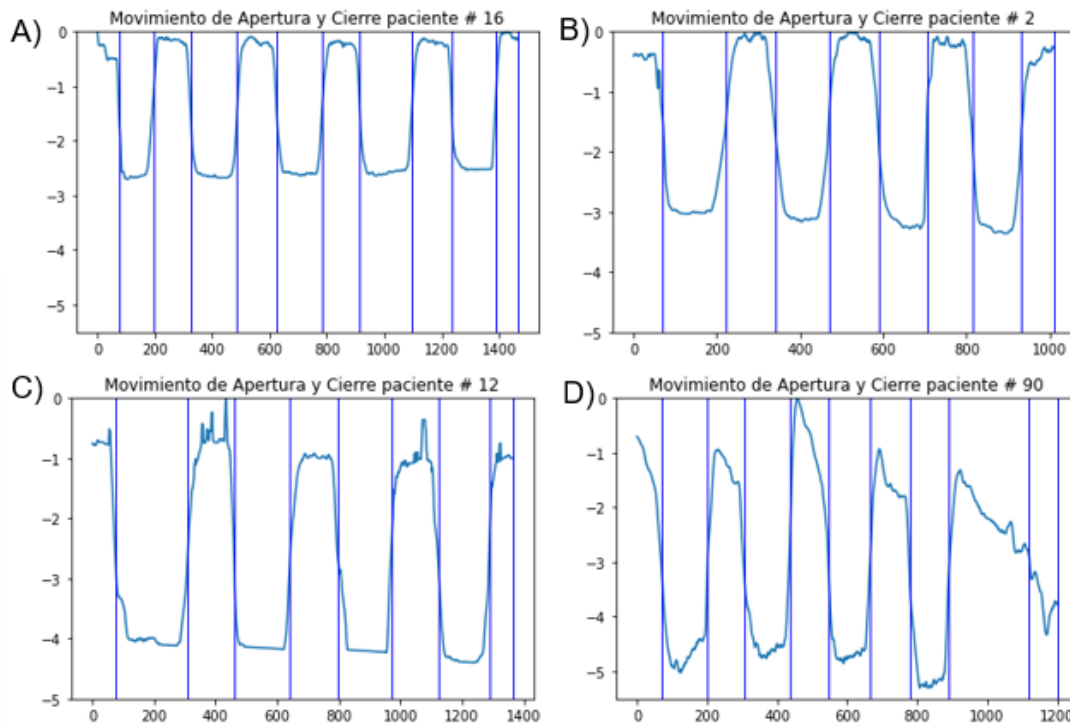


Figura 21 Movimientos de Apertura y cierre del paciente #16 en la figura A) la correcta ejecución de los 4 eventos de movimientos laterales, paciente #2 B), paciente #12 C) y del paciente #90 en D). Mientras que en las figuras B), C) y D) se presenta la ausencia de una repetición. Además, se ilustra en color azul marino podemos observar el método de rpt de la librería ruptures, la cual nos indica el inicio y termino de de los movimientos.

En el caso del paciente 12 se excluyó debido a la mala ejecución de los movimientos de lateralidades, ya que suponía para ellos un reto el poder ejecutarlos de una manera correcta.

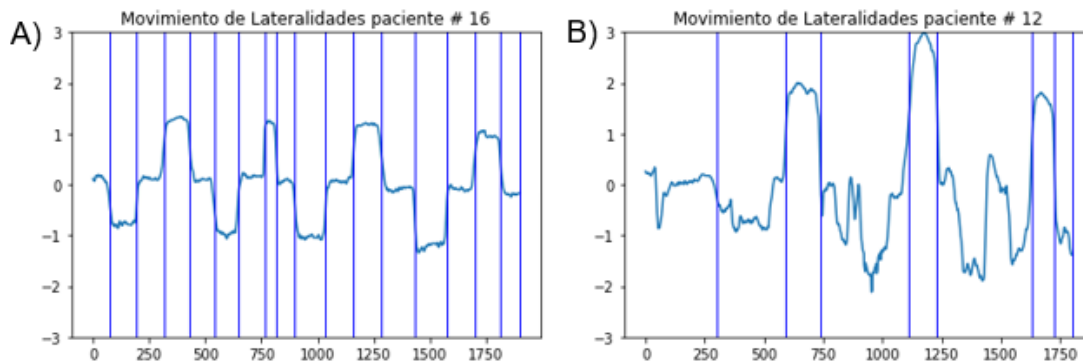


Figura 22 En la gráfica del paciente #16 en la figura A) podemos observar la correcta ejecución de los 4 eventos de los movimientos de lateralidades y pacientes #12 B). Mientras que en la figura B), podemos observar la dificultad que le genera, el realizar un correcto movimiento de la mandíbula

inferior a la derecha e izquierda posteriormente. Además, se ilustra en color azul la utilización del método rpt, lo cual nos ayuda a localizar el inicio y fin de los movimientos de lateralidades.

v. Selección de características

Como propuesta inicial se tomaron en consideración las siguientes características de los movimientos mandibulares como se muestra en la Tabla 6, titulada matriz de observaciones y variables. Estas corresponden a la experiencia, es decir a las características que se determinaron de los movimientos implementados por el paciente (apertura, cierre y lateralidades). Esto permitió un primer acercamiento al entrenamiento del algoritmo de clasificación.

Si definimos a x, y, z como las variables de posición. Sabiendo que velocidad se describe como x', y', z' , su aceleración como x'', y'', z'' y el jerk (sobre aceleración) como x''', y''', z''' . Todas las características se determinaron para cada marcador utilizado.

Tabla 6 Matriz de observaciones y variables iniciales

# de característica por movimiento	Movimiento	
	Apertura y Cierre	Lateralidades
9	max[x'], max[y'], max[z']	max[x'], max[y'], max[z']
9	prom[x'], prom[y'], prom[z']	prom[x'], prom[y'], prom[z']
9	max[x''], max[y''], max[z'']	max[x''], max[y''], max[z'']
9	prom[x''], prom[y''], prom[z'']	prom[x''], prom[y''], prom[z'']
9	max[x'''], max[y'''], max[z''']	max[x'''], max[y'''], max[z''']
9	prom[x'''], prom[y'''], prom[z''']	prom[x'''], prom[y'''], prom[z''']
1	max[x'y'z']	max[x'y'z']
1	max[x''y''z'']	max[x''y''z'']
1	max[x''''y''''z''']	max[x''''y''''z''']
1	prom[x'y'z']	prom[x'y'z']
1	prom[x''y''z'']	prom[x''y''z'']
1	prom[x''''y''''z''']	prom[x''''y''''z''']
2	max[x], max[y]	max[x], max[y]
2	min[x], min[y]	min[x], min[y]
2	area[x], area[y]	area[x], area[y]
Total	66 valores	66 valores

*Se calcula cada característica por cada marcador utilizado, por ello se obtienen 9 características resultantes.

De acuerdo con los diferentes artículos de kinesiología mandibular [48], [51], [86]–[89], podemos definir características utilizadas para la observación y análisis de los movimientos que nos ayuden a la clasificación de los trastornos de dicha articulación. Mencionan que aquellos relacionados con la aceleración, la desviación que llegan a presentarse en los movimientos respecto a los ejes X y, en apertura/cierre y lateralidades respectivamente, así como la velocidad.

De acuerdo con Calil *et al* [9], [14], notaron que existe una significancia estadística entre los pacientes con artralgia y el grupo control en el movimiento de apertura y cierre respecto al eje Y, mientras que en el grupo con mialgia y el control hubo una diferencia significativa en el movimiento de apertura y cierre con respecto al eje X. De acuerdo con sus conclusiones, los individuos que poseen algún Trastorno de la

ATM muestran una mayor desviación o deflexión lateral en los movimientos de apertura y cierre en comparación con el grupo control. Mientras que el grupo de mialgia presenta mayor desviación lateral en el movimiento de protrusión en comparación con los otros grupos.

La razón de cambio se adquirió ya que es comúnmente utilizada en fenómenos que estudian la variación entre periodos de un mismo valor. Por ello este valor permite describir y cuantificar a través de modelos matemáticos el comportamiento de la variable a analizar. Para nuestro estudio esta variable fue cuantificada e interpretada como una medida de fatiga, donde si el valor que adquiría era mayor a 1, generaba una pendiente positiva la cual es interpretada como la capacidad de elasticidad del músculo, es decir la capacidad del músculo que permite el movimiento de la mandíbula para estirarse y aumentar la longitud pero también brinda la posibilidad de que las fibras musculares vuelvan a su posición inicial, una vez que genera calor o bien se tiende a un calentamiento. En caso contrario, cuando el valor fuera menor a uno, indica una atrofia del músculo, es decir que el músculo estaba sobre estimulado y con ello su rendimiento era menor. La ecuación para determinar esta variable es dada por:

$$fat = \frac{m_p}{m_2} \tag{36}$$

Siendo m_p el promedio de la característica del penúltimo movimiento y m_2 es el promedio de la característica del segundo movimiento.

La razón de la utilización del segundo movimiento y no el primero. Es porque en la mayoría de los pacientes al inicio de la ejecución de los movimientos de apertura y cierre, llega a presentarse un desfase de la línea basal del primer movimiento respecto a los demás, como se observa en la Figura 23. Este desfase llega a presentarse de hasta 1 cm al inicio del movimiento.

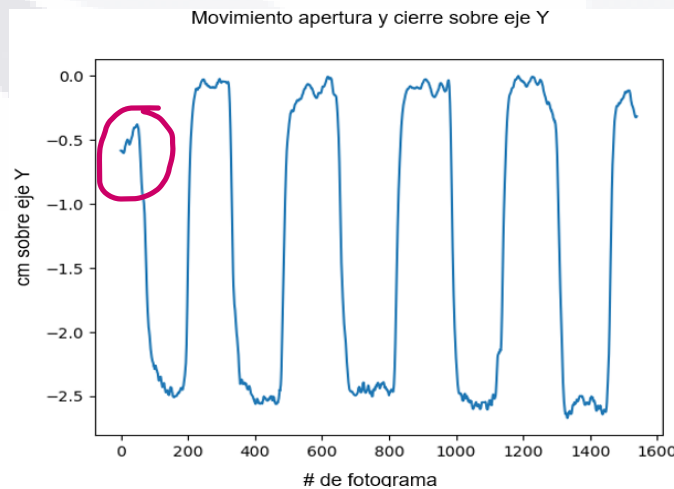


Figura 23 Se observa dentro del círculo color rojo el desfase de la línea basal al inicio respecto a los demás movimientos.

Se escogió el penúltimo movimiento de acuerdo con la fisiología de la intensidad muscular. Puesto que durante la primera ejecución la fuerza generada es la más alta. Sin embargo, la intensidad del esfuerzo es la más baja. Una vez que se ejecuta la primera repetición se utiliza solo el 10% de las fibras musculares, pero después de este movimiento debe recurrir a un mayor número de fibras para continuar con cada repetición sucesiva. Es decir, al llegar a la última repetición la intensidad es la más alta y la fuerza que se puede llegar a generar es la más baja [85], [86].

vi. Aprendizaje máquina supervisado

Para la clasificación de los datos se utilizarán algoritmos de aprendizaje supervisado, mediante Máquina de Soporte Vectorial, esto con la finalidad de obtener una función automática a partir de datos de entrenamiento, el cual consiste en entradas (características) provenientes de la identificación de los movimientos ejecutados por el paciente y resultados (etiqueta Mialgia, Artralgia y sanos) provenientes del diagnóstico ejecutado por el DC/TMD.

Para crear y hacer un correcto uso de las técnicas de *Machine Learning* se consideraron 3 elementos. La tarea de aprendizaje es aquella que describe como se lleva a cabo el algoritmo de clasificación, es decir el objetivo de éste; la experiencia que se refiere a los datos con los cuales será provisto y; por último, pero no menos importante la medida de desempeño, es decir como supo el algoritmo que estaba haciendo bien la clasificación. Se realizó una aplicación de aprendizaje máquina teniendo en cuenta:

- Tarea: Clasificación de pacientes de acuerdo con el tipo de TTM que padezcan
- Experiencia: Datos/características de los movimientos mandibulares esto siempre y cuando sean previamente diagnosticados clínicamente.
- Medida de desempeño: Resultado vs clasificación clínica, se busca que sean muy similares, o idénticas.

Sin embargo, se debe de garantizar que los datos obtenidos de un algoritmo de clasificación sean verídicos, por ello se hará la una validación cruzada (*k-fold cross validation*), la cual consiste en la toma de datos originales y crear a partir de ellos un conjunto de prueba y un segundo de validación. Este proceso se llevará a cabo por K iteraciones (de aquí su nombre), a fin de obtener una precisión alta y error final mínimo, el cual nos ayudará para alcanzar una mayor precisión para un modelo.

Los programas implementados para la recolección y procesamiento de los datos se harán por medio del lenguaje de programación Python, en el entorno de desarrollo para computo científico Spyder versión 3.8.5 (anaconda3), programa de desarrollo de software de código abierto, estándares y servicios para computación en múltiples lenguajes de programación.

CAPÍTULO 5. CONSIDERACIONES ÉTICAS DEL ESTUDIO

En este capítulo veremos la parte ética y normatividad para lograr el desarrollo del algoritmo. Se mencionan los protocolos existentes para el manejo de pacientes e información que nos proporcionaron.

Para que se lleve a cabo este protocolo, se tendrán en cuenta la normatividad nacional. que siga con los principios básicos; en caso de nuestro País, seguiremos lo establecido en la Ley General de Salud en Materia de investigación en Salud.

De igual manera nos basaremos en la Declaración de Helsinki y el Código de Nüremberg. se pondrá en práctica el principio de la proporcionalidad entre riesgo predecible y beneficios posibles, así como el respeto a los derechos del sujeto, prevaleciendo su interés por sobre los de la ciencia y la sociedad.

Se tendrá en cuenta el principio de confidencialidad por medio del consentimiento informado (Anexos) y respeto por la libertad del individuo. Y la epistemología mediante los principios del reporte de Belmont (Respeto por las personas, beneficencia y justicia).

Debido a que el método implementado es mínimamente invasivo, no fue necesario someterlo a consideración del comité de ética de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Sin embargo, se le explico el protocolo a cada paciente y se les pidió un consentimiento informado para su participación. El formato del consentimiento informado puede ser consultado en el Anexo A en la página 96

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

Durante el desarrollo de este capítulo se demostrarán los resultados encontrados durante la aplicación del protocolo. El instrumento DC/TMD se aplicó en un total de 116 pacientes. El 71% (n=82) de los participantes eran mujeres, el 41.5% (n=34) de ellas padecían artralgia, el 37.8% (n=31) padecen mialgia mientras que el resto (n=17) son pacientes totalmente sanos. En el caso de los hombres los cuales conformaban el 29% de los pacientes, el 32.4% (n=11) fue diagnosticado con mialgia, el 35.2% (n=12) padece de artralgia y el resto (n=11) son pacientes sanos.

La prevalencia de la patología en la población bajo estudio es de un 76.7%. Es decir, 7 de cada 10 personas poseen algún TTM. Como lo describen varios estudios realizados en diferentes estados de la república mexicana [24], [26], [28], [32]. En el caso para el desarrollo del algoritmo. Nuestra propuesta para la clasificación de TTMs se basa en la detección de características a partir de la captura de movimientos masticatorios. Dichas características se listan en la Tabla 7, titulada Matriz de características. Siendo x, y los vectores con las posiciones de los marcadores detectados en los ejes x y, respectivamente.

Tabla 7 *Matriz de características*

Clase	Características por movimiento			
Área	$\sum_{t=1}^T \bar{x}$	0 44	$\sum_{t=1}^T \bar{y}$	1 45
	$\text{var} \left[\sum_{t=1}^T \bar{x} \right]$	2 46	$\text{var} \left[\sum_{t=1}^T \bar{y} \right]$	3 47
	$\sum_{t \in t_2} x_2$	4 48	$\sum_{t \in t_2} y_2$	5 49
	$\sum_{t \in t_{n-1}} x_{n-1}$	6 50	$\sum_{t \in t_{n-1}} y_{n-1}$	7 51
	$\frac{\sum_{t \in t_{n-1}} x_{n-1}}{\sum_{t \in t_2} x_2}$	8 52	$\frac{\sum_{t \in t_{n-1}} y_{n-1}}{\sum_{t \in t_2} y_2}$	9 53
Velocidad	$\dot{\bar{x}}$	10 54	$\dot{\bar{y}}$	11 55
	$\text{var}[\dot{x}]$	12 56	$\text{var}[\dot{y}]$	13 57
	\dot{x}_2	14 58	\dot{y}_2	15 59
	\dot{x}_{n-1}	16 60	\dot{y}_{n-1}	17 61
	$\frac{\dot{x}_{n-1}}{\dot{x}_2}$	18 62	$\frac{\dot{y}_{n-1}}{\dot{y}_2}$	19 63
Aceleración	\ddot{x}_2	20 64	\ddot{y}_2	21 65
	$\text{max}[\ddot{x}]$	22 66	$\text{max}[\ddot{y}]$	23 67
	$\ddot{\bar{x}}$	24 68	$\ddot{\bar{y}}$	25 69
	$\text{var}[\ddot{x}]$	26 70	$\text{var}[\ddot{y}]$	27 71
	\ddot{x}_2	28 72	\ddot{y}_2	29 73
	$\frac{\ddot{x}_{n-1}}{\ddot{x}_2}$	30 74	$\frac{\ddot{y}_{n-1}}{\ddot{y}_2}$	31 75
Desviación	$\text{max}[\ddot{x}]$	32 76	$\text{max}[\ddot{y}]$	33 77
	$dx = \{ \text{max}[x_1], \dots, \text{max}[x_{n-1}] \}$	34 78	$dy = \{ \text{max}[y_1], \dots, \text{max}[y_{n-1}] \}$	35 79
	$vdx = \text{var}[\{ \text{max}[x_1], \dots, \text{max}[x_{n-1}] \}]$	36 80	$vd y = \text{var}[\{ \text{max}[y_1], \dots, \text{max}[y_{n-1}] \}]$	37 81
	$\text{max}[x_2]$	38 82	$\text{max}[y_2]$	39 83
	$\text{max}[x_{n-1}]$	40 84	$\text{max}[y_{n-1}]$	41 85
	$\frac{\text{max}[x_{n-1}]}{\text{max}[x_2]}$	42 86	$\frac{\text{max}[y_{n-1}]}{\text{max}[y_2]}$	43 87

Preguntas	$j_c = \begin{cases} 1 & \text{si el paciente sentia un chasquido durante la ejecución del protocolo} \\ 0 & \text{si el paciente no sentia un chasquido durante la ejecución del protocolo} \end{cases}$ $j_p = \begin{cases} 1 & \text{si el paciente sentia un dolor durante la ejecución del protocolo} \\ 0 & \text{si el paciente no sentia un dolor durante la ejecución del protocolo} \end{cases}$
Total	90 características

En la esquina superior de cada característica se enumera.

En la Tabla 7, \bar{x} y \bar{y} hace referencia al promedio; $\text{var}[x]$ y $\text{var}[y]$ es la varianza; x_2 es el 2do movimiento, al igual que x_{n-1} que es el penúltimo movimiento; $\frac{x_{n-1}}{x_2}$ es la razón de cambio entre ambos movimientos y $\max[x]$ es el valor máximo de la velocidad. \dot{x} es el vector de la velocidad y \ddot{x} corresponde al vector de aceleración. Además, se mencionan las 88 variables de las que se hablan. Se enumera desde el 0 la primera característica ($\sum_{t=1}^T \bar{x}$) del área de apertura y cierre, después le siguen las variables de velocidad, aceleración y por ultimo las características de desviación. Las dos características finales son la presencia de dolor (88) y chasquido articular durante el proceso de los movimientos (89).

Se calcularon 88 características en total. Para reducir el número de características, en una primera etapa, se eliminaron las variables con alta redundancia según su valor medio, quedando un total de 40 características. Es decir, eliminamos aquellos valores de los movimientos 2 y penúltimo, ya que estos valores estaban directamente relacionados con el valor de la razón de cambio, su correlación era alta entre estos valores. Asociado igualmente a la correlación de valores se eliminaron los valores de la varianza, puesto que este valor está relacionado con la media directamente.

Se redujo aún más el número de características por ello, se analizó el centro y la mediana de las poblaciones mediante el diagrama de brazos aquellas características que tuvieran diferencias entre categorías (Sano, Mialgia y Artralgia) o existiera una diferencia significativa en al menos una de las categorías guiándonos en la mediana de las categorías. Al analizar minuciosamente este gráfico, pudimos obtener un total de 20 características que podrían describir y diferenciar al menos una categoría entre las 3 existentes.

Finalmente, se redujeron las características a 20, las cuales finalmente serán empleadas para evaluar la clasificación de pacientes con TTM mencionadas en la Tabla 8. Ondeando en la literatura y en los principales síntomas de este tipo de patologías, el dolor y el chasquido articular forman parte esencial para poder diagnosticarse. Por ello se incluyeron como características principales para comenzar en el análisis de datos. Estas dos características las obtuvimos del DC/TMD en la primera parte, donde se cuestiona al paciente sobre dolor y ruido articular al ejecutar los movimientos de apertura/cierre y lateralidades. Sin embargo, durante las grabaciones de los movimientos los mismos pacientes referían dolor y el chasquido de su articulación en la ejecución de ambos movimientos.

Tabla 8 Características seleccionadas después del análisis del diagrama de brazos de la Tabla 7.

# de Característica	Movimientos		Presencia	
	Apertura/Cierre	Lateralidades	Dolor	Chasquido
0		44	88	89
1		52		
9		53		
11		54		
18		62		
23		63		
34		67		
35		74		
42		75		
		78		
		79		

A. CORRELACIÓN DE PEARSON

Para poder utilizar el método de reducción de variables mediante un modelo lineal de regresión logística, se tuvo en consideración aspectos importantes. Uno es que no existiera colinealidad, que la muestra sea estandarizada. Para ello se realizó una correlación de Pearson, la cual eliminó la colinealidad de las características. Se descartó a las características con un valor mayor a 0.65 que aún se conservaban después del análisis con el diagrama de brazos. El gráfico de correlación se observa en la Figura 24, donde la interacción entre dos variables estaba dado de acuerdo con un sistema de colores, en el cual 1 tiende al blanco y 0 a un color negro. Por ello los colores que tiende al blanco y anaranjado son los valores que se eliminaron de la muestra.

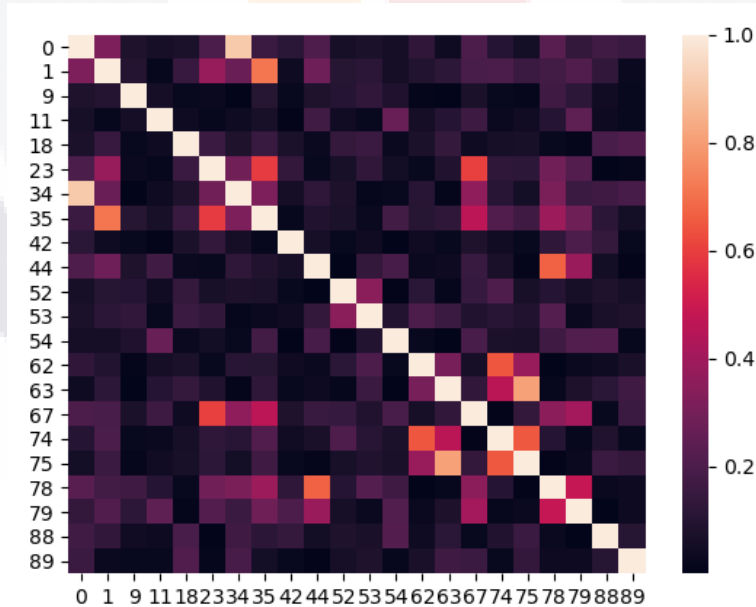


Figura 24 Correlación de Pearson de las variables restantes. Eliminando las variables 0, 74, 75, 1 y 44 ya que existía colinealidad entre estas variables.

En la Tabla 9 observamos las 17 características resultantes después de la correlación.

Tabla 9 Características seleccionadas después del análisis de correlación de Pearson de la Tabla 8.

# de Característica	Movimientos		Presencia	
	Apertura/Cierre	Lateralidades	Dolor	Chasquido
	9	52	88	89
	11	53		
	18	54		
	23	62		
	34	63		
	35	67		
	42	78		
		79		

B. REGRESIÓN LOGÍSTICA PARA REDUCCIÓN DE DIMENSIONALIDAD (MÉTODO ELIMINACIÓN RECURSIVA DE CARACTERÍSTICAS)

A partir de las 17 características resultantes del análisis de correlación de Pearson, ver Tabla 9, se realizó una reducción de dimensiones y selección de características mediante un método de eliminación recursiva de características (*Recursive Features Elimination*) [71], [92]. El método utiliza métodos de regresión y clasificación, sin embargo, la literatura menciona que los modelos o algoritmos con un mayor rendimiento para este tipo de método es la utilización de regresión logística [93].

Sirve principalmente para la reducir la complejidad del modelo, facilitar su interpretación, así como mejorar el rendimiento del modelo y reducir la dimensionalidad del conjunto de datos. Este método se define por medio de 3 parámetros principales. Un estimador es decir un modelo para ajustar la información sobre la importancia de la característica. El cual se configura de acuerdo con regresión logística, mediante un modelo lineal como lo denota la ecuación (37). El número de funciones para seleccionar y por último el número de características que se elimina en cada iteración.

$$f(x) = \beta_0 + \beta_1x_{1,i} + \dots + \beta_kx_{k,i} \tag{37}$$

El modelo utilizado fue entrenado por el conjunto de entrenamiento usando todas las características. Luego considera los parámetros $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$ asociado con cada característica los cuales son los que ajustan el modelo y minimizan los residuos; además de dar la importancia a la variable. Elimina el coeficiente menos importante y reconstruye el modelo, esto se repite hasta que deje el número de funciones a seleccionar. El método en grandes rasgos del funcionamiento lo podemos observar en la Figura 25.

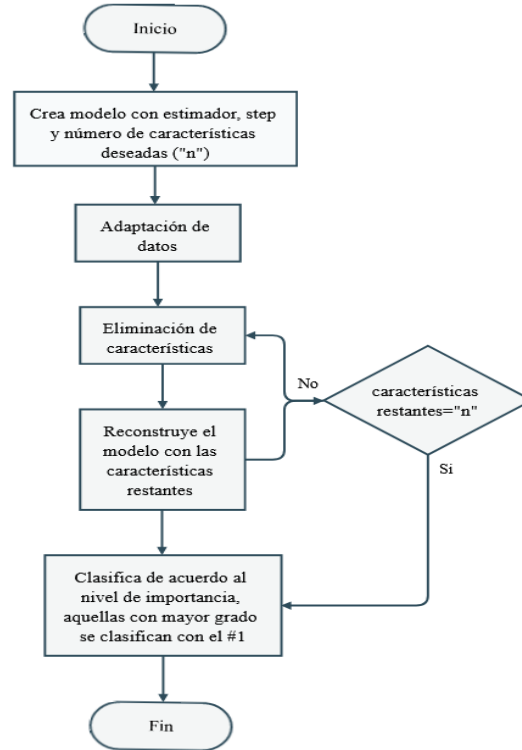


Figura 25 Diagrama del modelo de proceso del RFE

Mediante el comando de `rfe.ranking_` se obtiene la clasificación de acuerdo con la posición de la clasificación de la función, por medio del nivel de importancia en el modelo, mediante las ecuaciones (10) y(11). Mediante la utilización de estas se les asigna un valor de importancia y con ello la numeración. Donde 1 es la variable con mayor asociación al modelo, y los numero sucesivos son menos asociación al modelo.

Se realizaron 5 subclasificaciones para un mejor entendimiento y poder comprender el comportamiento de las diferentes patologías. Se propusieron las subclasificaciones mencionadas en la Tabla 10.

Tabla 10 Clasificación de las diferentes Trastornos Temporomandibulares

Subclasificación:	Pacientes		
	Sanos	Mialgia	Artralgia
Sanos vs Enfermos	+		X
Sanos vs Artralgia	+		X
Sanos vs Mialgia	+	X	
Mialgia vs Artralgia		+	X
Sanos vs Mialgia vs Artralgia	+	O	X

* Donde cada carácter representa un grupo de cada subclasificación al introducirlo a los algoritmos.

En el caso de la Figura 26, se observa la implementación del método RFE con la solicitud de conservar la característica con mayor asociación al modelo. Este proceso se realizó en cada una de las subclasificaciones, solicitando que conservara las 4 características con mayor asociación e importancia en el modelo.

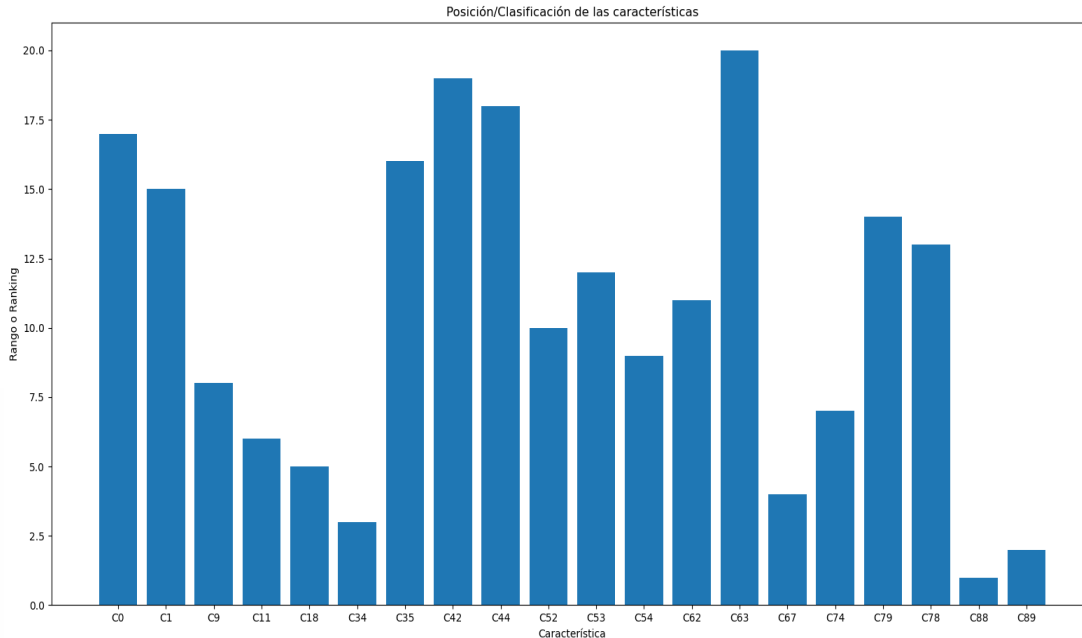


Figura 26 Representación de las características catalogadas por medio de una numeración. Donde 1 representa una mayor asociación a la variable de salida y el 17 representa una menor asociación con la variable de salida. Es decir, C88 es la característica con mayor asociación a la variable de diagnóstico, caso contrario lo que ocurre con C63, que es aquella característica que menor se asocia a la variable de diagnóstico. Este diagrama es una representación de la subclasificación Sanos vs Mialgia vs Artralgia.

La configuración para el RFE fue: un estimador de regresión logística (ecuación (38), un total de 4 característica que deseamos tener al final de la evaluación, la función de importancia fue dada por los parámetros (b_0, b_1, \dots, b_n) , el step lo dejamos en 1 ya que es el número de características a eliminar del modelo.

$$p = f(a + b_0x_0 + b_1x_1 + \dots + b_nk_n) \quad (38)$$

La regresión logística es un estimador que puede determinar la probabilidad de variable para cada una de las subclasificaciones. Este tipo de método matemático es utilizado para el análisis de datos debido a su versatilidad y la información que pueden generar. Debido a ello, su presencia se ha notado cada vez más en el ámbito clínico. Ya que trata de explicar e inclusive predecir características cualitativas a partir de otras variables conocidas, ya sean cualitativas o cuantitativas (variables explicativas) [94].

He de explicar que se meten todas las características al RFE para cada subclasificación. En la Figura 27 se muestra la clasificación de las características de acuerdo con la importancia en el modelo, solicitando que conserve 4 de ellas.

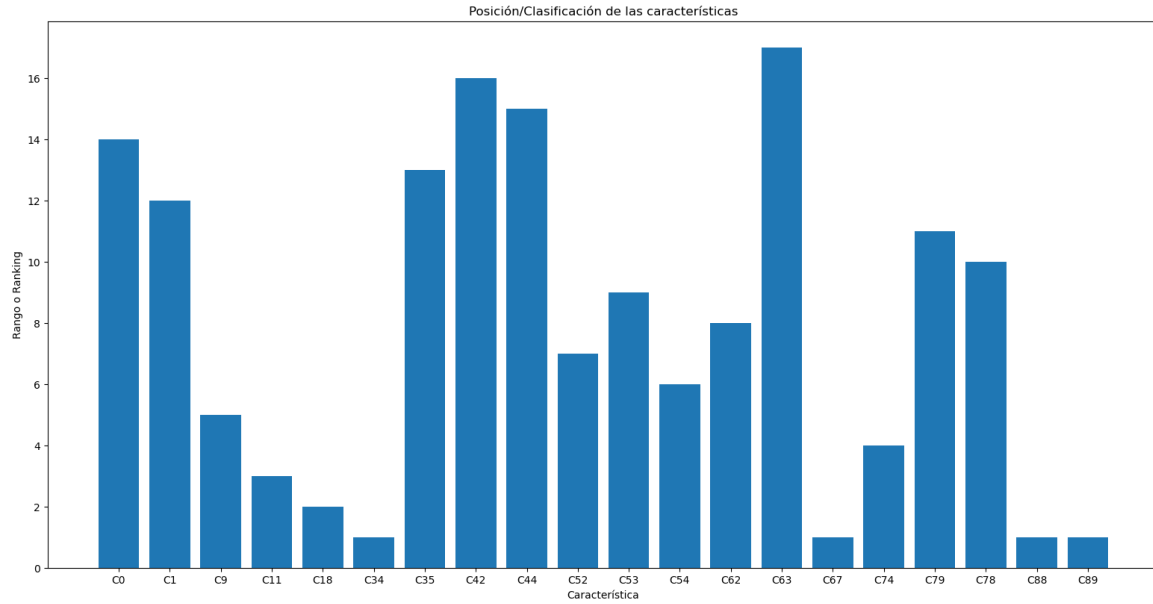


Figura 27 Representación de las características catalogadas por medio de una numeración. Donde 1, son C34, C67, C88 y C89 que representa una mayor asociación a la variable de diagnóstico y las restantes representan una menor asociación con la variable de diagnóstico. Este esquema representa la subclasificación de Sanos vs Mialgia.

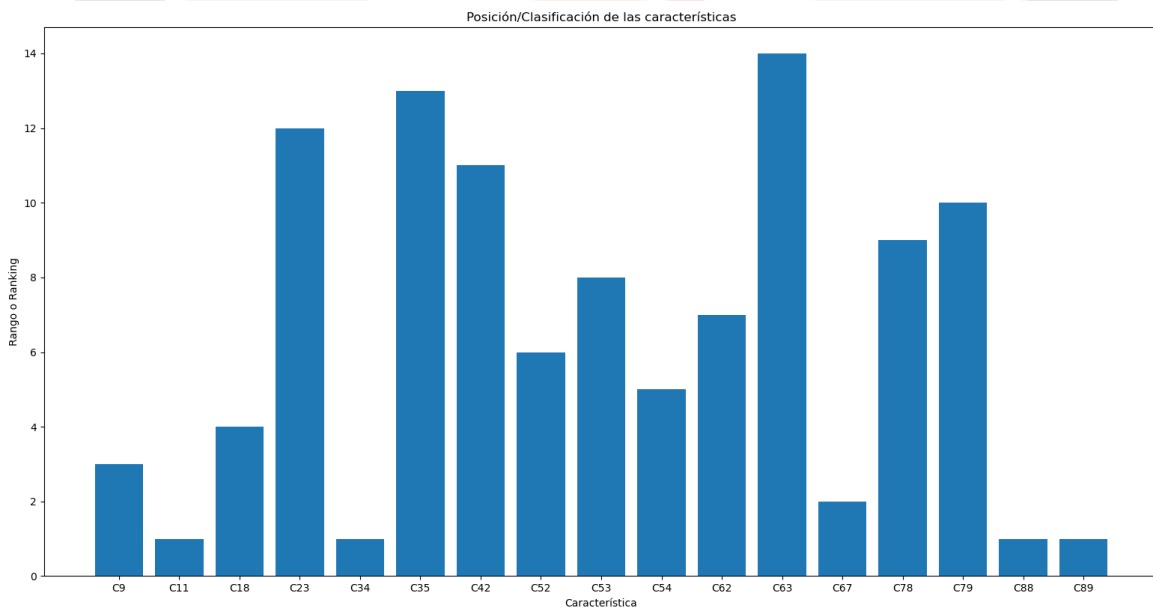


Figura 28 Representación de las características catalogadas por medio de una numeración. Donde 1, son C11, C34, C88 y C89 que representa una mayor asociación a la variable de diagnóstico y las restantes representan una menor asociación con la variable de diagnóstico. Este esquema representa la subclasificación de Sanos vs Enfermos.

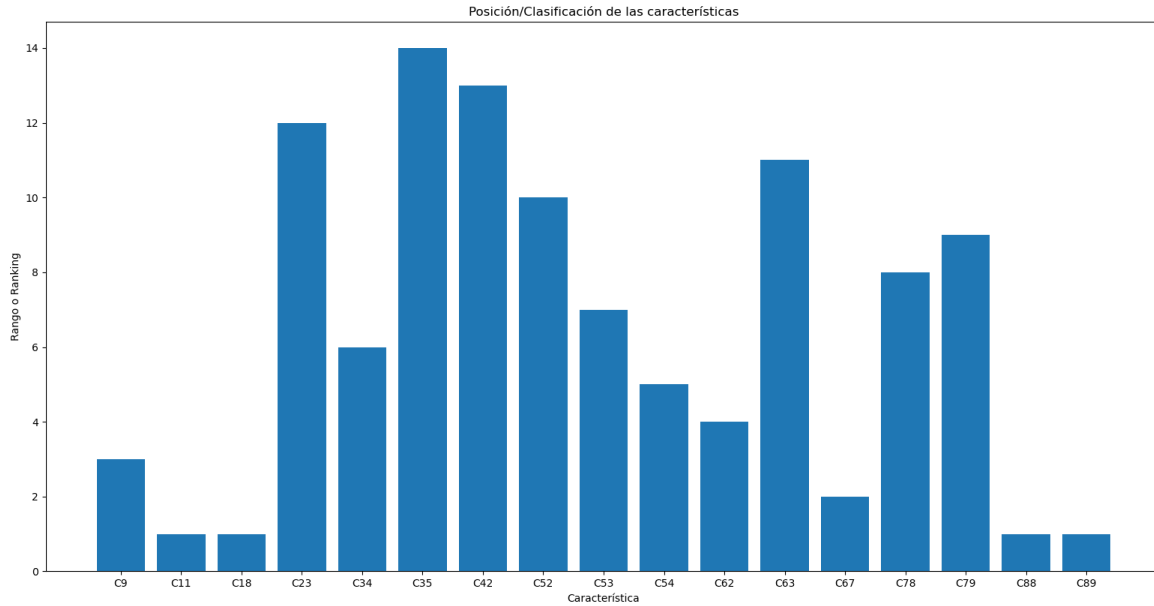


Figura 29 Representación de las características catalogadas por medio de una numeración. Donde 1, son C11, C18, C88 y C89 que representa una mayor asociación a la variable de diagnóstico y las restantes representan una menor asociación con la variable de diagnóstico. Este esquema representa la subclasificación de Sanos vs Mialgia.

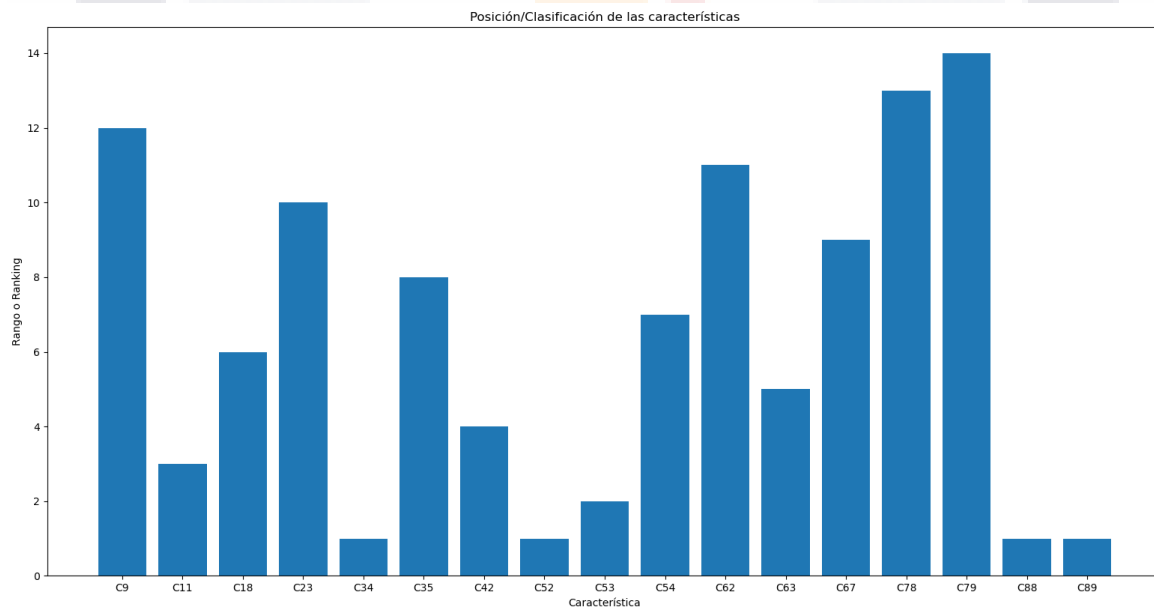


Figura 30 Representación de las características catalogadas por medio de una numeración. Donde 1, son C34, C52, C88 y C89 que representa una mayor asociación a la variable de diagnóstico y las restantes representan una menor asociación con la variable de diagnóstico. Este esquema representa la subclasificación de Sanos vs Artralgia.

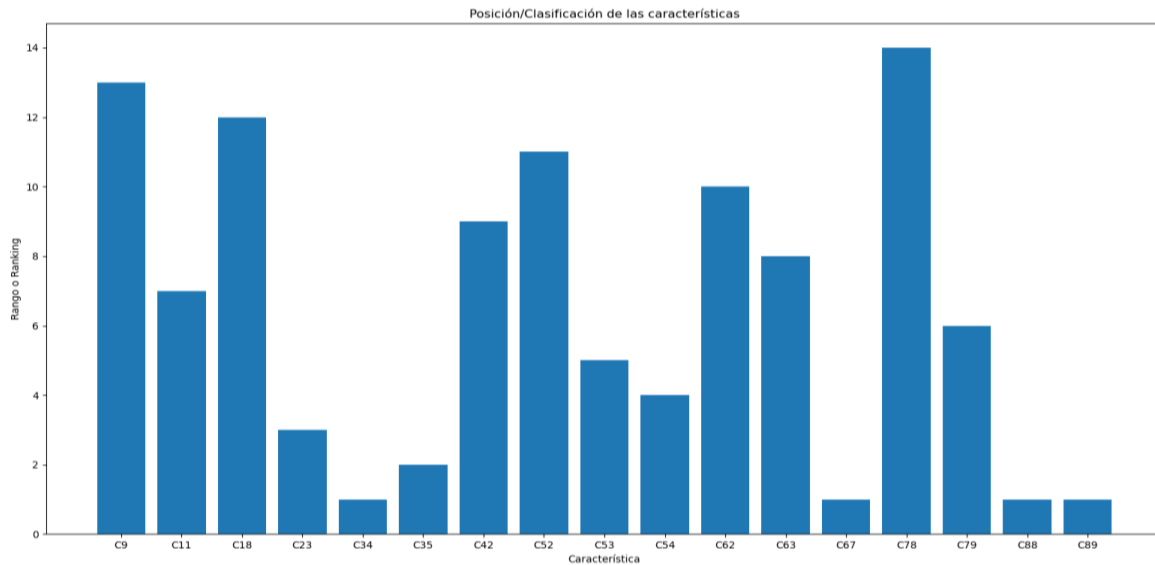


Figura 31 Representación de las características catalogadas por medio de una numeración. Donde 1, son C34, C67, C88 y C89 que representa una mayor asociación a la variable de diagnóstico y las restantes representan una menor asociación con la variable de diagnóstico. Este esquema representa la subclasificación de Mialgia vs Artralgia.

C. ANOVA TIPO II

Para este proceso de reducción de características, se experimentó fijando el número de variables de salida a 6, 5 y 4. Obteniendo siempre en los primeros 4 lugares las mismas características, como observamos en la Figura 26. Esto debido a que el algoritmo determina y ordena las características de acuerdo con el nivel de importancia y su aportación al modelo de regresión lineal.

Tomamos las 4 características con mayor importancia en todas las subclasificaciones. Esto se realizó mediante una ANOVA con suma de cuadrados tipo II, se corroboró la significancia de las variables en el modelo de acuerdo con cada subclasificación, siempre y cuando el valor de p estuviera dentro del nivel de confianza ($p < 0.05$) después de efectuar el RFE. Estas 5 características las podemos observar en negritas en la Tabla 17. Se implementó este proceso, puesto que el método de RFE hace la reducción de las variables, sin embargo, no lleva a cabo si la variable aporta significativamente al modelo de clasificación. Las características que se implementan en el SVM son las descritas en la Tabla 11

Tabla 11 Definición de características seleccionadas y expresión matemática.

CARACTERÍSTICA	DEFINICIÓN	FÓRMULA
C34	Media de la desviación sobre el eje X en el movimiento de apertura y cierre	$\frac{dx}{= \{max[x_1], \dots, max[x_{n-1}]\}}$
C52	Razón de cambio de la velocidad respecto al eje X en el movimiento de lateralidades	$\frac{\sum_{t \in t_{n-1}} x_{n-1}}{\sum_{t \in t_2} x_2}$
C67	Media de la aceleración respecto al eje Y en el movimiento de lateralidades	\bar{y}
C88	Presencia de ruido articular durante la ejecución de los movimientos	j_c
C89	Presencia de dolor durante la ejecución de los movimientos.	j_p

En las Tabla 12, Tabla 13, Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16, se muestran los resultados de ANOVA para reducir el número de características y permanezcan las más significantes en las diferentes subclasificaciones.

Tabla 12 Implementación del método de ANOVA de las características obtenidas para cada subclasificación, confirmando la asociación de la variable independiente al diagnóstico. Dentro del círculo azul tenemos las características de la subclasificación Mialgia vs Artralgia, y en el rectángulo rojo podemos observar el valor p, el cual nos proporciona si aceptamos o rechazamos la hipótesis causal o de asociación de la característica al Diagnóstico

CARACTERÍSTICAS	SUMA DE CUADRADOS	DF	F	PR(>F)
C34	1.467	1	6.707	0.011
C67	1.475	1	6.744	0.011
C88	0.658	1	3.007	0.087
C89	0.624	1	2.851	0.095
RESIDUAL	18.150	83		

Tabla 13 Implementación del método de ANOVA de las características obtenidas para cada subclasificación, confirmando la asociación de la variable independiente al diagnóstico. Dentro del círculo azul tenemos las características de la subclasificación Sano vs Mialgia vs Artralgia, y en el rectángulo rojo podemos observar el valor p, el cual nos proporciona si aceptamos o rechazamos la hipótesis causal o de asociación de la característica al Diagnóstico

CARACTERÍSTICAS	SUMA DE CUADRADOS	DF	F	PR(>F)
C34	2.236	1	7.155	0.008
C67	0.827	1	2.649	0.107
C88	19.076	1	61.105	1.85e ⁻¹²
C89	5.133	1	16.441	1.81e ⁻⁰⁴
RESIDUAL	33.404	107		

Tabla 14 Implementación del método de ANOVA de las características obtenidas para cada subclasificación, confirmando la asociación de la variable independiente al diagnóstico. Dentro del círculo azul tenemos las características de la subclasificación Sano vs Enfermos, y en el rectángulo rojo podemos observar el valor p, el cual nos proporciona si aceptamos o rechazamos la hipótesis causal o de asociación de la característica al Diagnóstico

CARACTERÍSTICAS	SUMA DE CUADRADOS	DF	F	PR(>F)
C11	0.304	1	3.643	0.059
C34	0.086	1	1.030	0.313
C88	6.682	1	80.096	1.20e ⁻¹⁴
C89	1.396	1	16.735	8.35e ⁻⁰⁵
RESIDUAL	8.927	107		

Tabla 15 Implementación del método de ANOVA de las características obtenidas para cada subclasificación, confirmando la asociación de la variable independiente al diagnóstico. Dentro del círculo azul tenemos las características de la subclasificación Sano vs Mialgia, y en el rectángulo rojo podemos observar el valor p, el cual nos proporciona si aceptamos o rechazamos la hipótesis causal o de asociación de la característica al Diagnóstico

CARACTERÍSTICAS	SUMA DE CUADRADOS	DF	F	PR(>F)
C11	0.180	1	1.462	0.231
C18	0.193	1	1.567	0.215
C88	3.914	1	31.675	5.30e ⁻⁰⁷
C89	0.918	1	7.432	8.42e ⁻⁰³
RESIDUAL	7.289	59		

Tabla 16 Implementación del método de ANOVA de las características obtenidas para cada subclasificación, confirmando la asociación de la variable independiente al diagnóstico. Dentro del círculo azul tenemos las características de la subclasificación Sano vs Artralgia, y en el rectángulo rojo podemos observar el valor p, el

cual nos proporciona si aceptamos o rechazamos la hipótesis causal o de asociación de la característica al Diagnóstico

CARACTERÍSTICAS	SUMA DE CUADRADOS	DF	F	PR(>F)
C34	1.665	1	9.115	0.003
C52	1.136	1	6.218	0.016
C88	6.415	1	13.152	0.999
C89	1.158	1	6.148	0.982
RESIDUAL	4.062	67		

En la Tabla 17 mostramos las 4 características con mayor puntaje después del método de eliminación de características.

Tabla 17 Características con mayor grado de importancia en cada tipo de subclasificación.

Subclasificación	Características
Sano vs Enfermo	$\bar{y}^{(oc)}, dx^{(oc)}, j_c, j_p$
Sano vs Mialgia	$\bar{y}^{(oc)}, \frac{\bar{x}_{n-1}^{(oc)}}{\bar{x}_2}, dx^{(oc)}, j_c, j_p$
Sano vs Artralgia	$dx^{(oc)}, \frac{\sum_{t \in t_{n-1}} x_{n-1}^{(lat)}}{\sum_{t \in t_2} x_2}, j_c, j_p$
Mialgia vs Artralgia	$dx^{(oc)}, \bar{y}^{(lat)}, j_c, j_p$
Sano vs Mialgia vs Artralgia	$dx^{(oc)}, \bar{y}^{(lat)}, j_c, j_p$

* En negritas se muestra las características predominantes y que cumplen con el nivel de confianza (95%) de acuerdo con cada subclasificación, después de aplicar un ANOVA con suma de cuadrados tipo II. Donde (oc) se refiere al movimiento de apertura y cierre, y (lat) se refiere al movimiento de lateralidades

D. MÁQUINA DE SOPORTE VECTORIAL Y RENDIMIENTO

Dichas variables sirvieron para entrenar el algoritmo de SVM, en el cual se programó con tres diferentes kernel. Uno de tipo lineal siguiendo la ecuación (19), el segundo de tipo RBF o gaussiano denotado en la ecuación (20) y un último de tipo Polinomio siguiendo la ecuación (21). Todos los kernel se introdujeron en el SVM, se ajustó el modelo a los datos de entrenamiento estratificado esto para poder conocer el rendimiento de ambos algoritmos en las clasificaciones de los TTM. Este tipo de validación cruzada se explica mejor en la Sección IX, en la página 37

Los valores de rendimiento que generó las subclasificaciones de acuerdo con el kernel implementado se muestran a continuación en la Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20. En la tabla (a) se muestra el rendimiento con las 5 características provenientes después de la implementación del ANOVA, y la tabla (b) muestra el rendimiento con las características relacionadas directamente del SVC. En negritas observamos el mejor rendimiento entre las subclasificaciones.

Tabla 18 a) Rendimiento del algoritmo de SVM con el kernel lineal, en las diferentes subclasificaciones. Con las 5 características después del ANOVA

LINEAL	CG vs AG vs MG	CG+AG vs MG	CG+MG vs AG	MG vs AG	CG vs DG
Error de clase ± var	0.24±0.03	0.36±0.001	0.32±0.03	0.37±0.04	0.07±0.01
Sensibilidad ± var	0.59±0.20	0.08±0.03	0.73±0.09	0.86±0.06	0.93±0.01
Especificidad ± var	0.86±0.04	0.96±0.01	0.67±0.05	0.37±0.12	0.93±0.06
AUROC ± var	0.83± 0.01	0.53±0.08	0.80±0.04	0.67±0.07	0.92±0.02

b) Rendimiento del algoritmo de SVM con el kernel lineal, en las diferentes subclasificaciones. Con las 3 características obtenidas mediante el SVC.

<i>LINEAL</i>	<i>CG vs AG vs MG</i>	<i>CG+AG vs MG</i>	<i>CG+MG vs AG</i>	<i>MG vs AG</i>	<i>CG vs DG</i>
Error de clase \pm var	0.31 \pm 0.02	0.36 \pm 0.004	0.36 \pm 0.03	0.39 \pm 0.04	0.21 \pm 0.004
Sensibilidad \pm var	0.13 \pm 0.06	0.08 \pm 0.06	0.30 \pm 0.08	0.92\pm0.07	1.0 \pm 0.0
Especificidad \pm var	0.95\pm0.01	0.96\pm0.01	0.90\pm0.02	0.28 \pm 0.16	0.0 \pm 0.0
AUROC \pm var	0.83 \pm 0.07	0.56 \pm 0.09	0.68 \pm 0.06	0.60 \pm 0.06	0.71 \pm 0.10

En negritas se puede observar los mejores resultados en el rendimiento del algoritmo respecto a las diferentes subclasificaciones. Donde vs es versus o contrario, var = varianza, CG = grupos control, AG = Grupo con Artralgia, MG = Grupo con Mialgia y DG = Grupo enfermo.

Tabla 19 a) Rendimiento del algoritmo de SVM con el kernel gaussiano, en las diferentes subclasificaciones. Con las 5 características después del ANOVA

<i>RBF</i>	<i>CG vs AG vs MG</i>	<i>CG+AG vs MG</i>	<i>CG+MG vs AG</i>	<i>MG vs AG</i>	<i>CG vs DG</i>
Error de clase \pm var	0.34 \pm 0.02	0.36 \pm 0.01	0.42 \pm 0.04	0.47 \pm 0.03	0.24 \pm 0.01
Sensibilidad \pm var	0.14 \pm 0.08	0.13 \pm 0.07	0.26 \pm 0.11	0.83 \pm 0.07	0.97\pm0.01
Especificidad \pm var	0.91 \pm 0.03	0.93 \pm 0.01	0.82 \pm 0.06	0.18 \pm 0.11	0.07 \pm 0.01
AUROC \pm var	0.48 \pm 0.09	0.43 \pm 0.05	0.49 \pm 0.08	0.45 \pm 0.07	0.34 \pm 0.06

b) Rendimiento del algoritmo de SVM con el kernel gaussiano, en las diferentes subclasificaciones. Con las 3 características obtenidas mediante el SVC

<i>RBF</i>	<i>CG vs AG vs MG</i>	<i>CG+AG vs MG</i>	<i>CG+MG vs AG</i>	<i>MG vs AG</i>	<i>CG vs DG</i>
Error de clase \pm var	0.34 \pm 0.02	0.37 \pm 0.01	0.40 \pm 0.04	0.47 \pm 0.02	0.25 \pm 0.01
Sensibilidad \pm var	0.14 \pm 0.08	0.08 \pm 0.03	0.30 \pm 0.11	0.87 \pm 0.04	0.96\pm0.01
Especificidad \pm var	0.91 \pm 0.03	0.95 \pm 0.01	0.85 \pm 0.05	0.13 \pm 0.07	0.01 \pm 0.01
AUROC \pm var	0.43 \pm 0.09	0.43 \pm 0.06	0.41 \pm 0.08	0.42 \pm 0.08	0.41 \pm 0.09

En negritas se puede observar los mejores resultados en el rendimiento del algoritmo respecto a las diferentes subclasificaciones. Donde vs es versus o contrario, var = varianza, CG = grupos control, AG = Grupo con Artralgia, MG = Grupo con Mialgia y DG = Grupo enfermo.

Tabla 20 a) Rendimiento del algoritmo de SVM con el kernel polinomial, en las diferentes subclasificaciones. Con las 5 características después del ANOVA

<i>Polinomial</i>	<i>CG vs AG vs MG</i>	<i>CG+AG vs MG</i>	<i>CG+MG vs AG</i>	<i>MG vs AG</i>	<i>CG vs DG</i>
Error de clase \pm var	0.33 \pm 0.01	0.36 \pm 0.01	0.42 \pm 0.004	0.44 \pm 0.01	0.21 \pm 0.004
Sensibilidad \pm var	0.01 \pm 0.004	0.03 \pm 0.01	0.0 \pm 0.0	0.98\pm0.01	1.0\pm0.0
Especificidad \pm var	0.99 \pm 0.001	0.99 \pm 0.003	1.0 \pm 0.0	0.01 \pm 0.06	0.0 \pm 0.0
AUROC \pm var	0.58 \pm 0.09	0.42 \pm 0.11	0.49 \pm 0.07	0.39 \pm 0.10	0.55 \pm 0.21

b) Rendimiento del algoritmo de SVM con el kernel polinomial, en las diferentes subclasificaciones. Con las 3 características obtenidas mediante el SVC

Polinomial	CG vs AG vs MG	CG+AG vs MG	CG+MG vs AG	MG vs AG	CG vs DG
Error de clase \pm var	0.34 \pm 0.02	0.36 \pm 0.001	0.43 \pm 0.004	0.44 \pm 0.01	0.21 \pm 0.004
Sensibilidad \pm var	0.12 \pm 0.06	0.03 \pm 0.01	0.0 \pm 0.0	0.98\pm0.01	1.0\pm0.0
Especificidad \pm var	0.91 \pm 0.02	0.99 \pm 0.003	1.0 \pm 0.0	0.08 \pm 0.06	0.0 \pm 0.0
AUROC \pm var	0.45 \pm 0.08	0.42 \pm 0.11	0.52 \pm 0.07	0.39 \pm 0.10	0.41 \pm 0.07

En negritas se puede observar los mejores resultados en el rendimiento del algoritmo respecto a las diferentes subclasificaciones. Donde vs es versus o contrario, var = varianza, CG = grupos control, AG = Grupo con Artralgia, MG = Grupo con Mialgia y DG = Grupo enfermo.

E. CURVA ROC

De la Figura 32 a la Figura 36, se muestran las gráficas de la curva ROC con las 5 características resultantes del ANOVA, el rendimiento de los algoritmos es con el kernel Lineal en las distintas subclasificaciones.

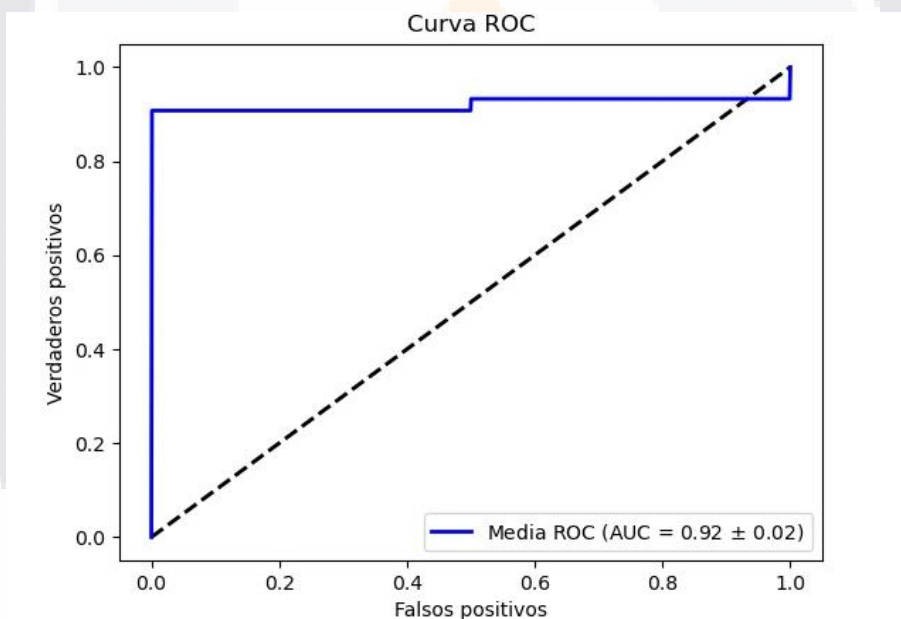


Figura 32 Curva ROC entre el grupo de Sanos (CG) contra el grupo de Enfermos (DG).

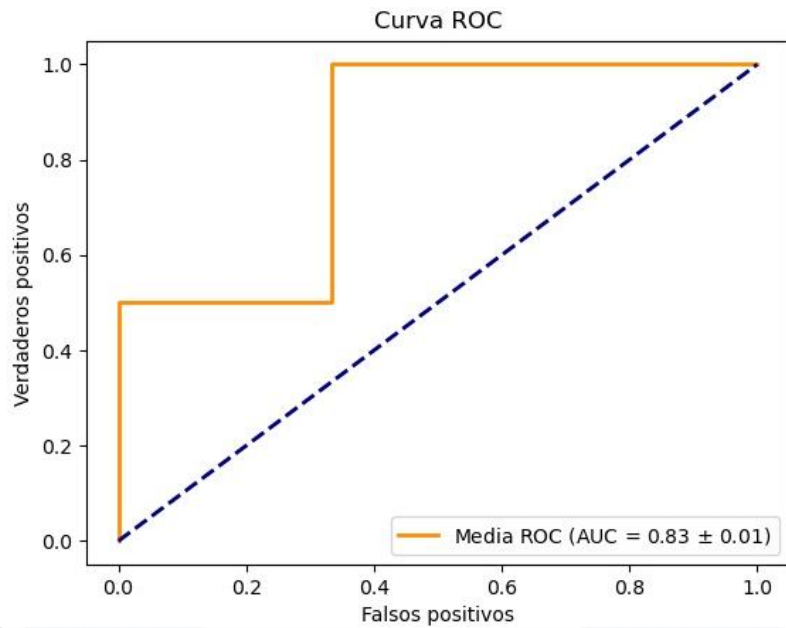


Figura 33 Curva ROC entre el grupo de Sanos (CG) contra el grupo de Mialgia (MG) contra el grupo de Artralgia (AG).

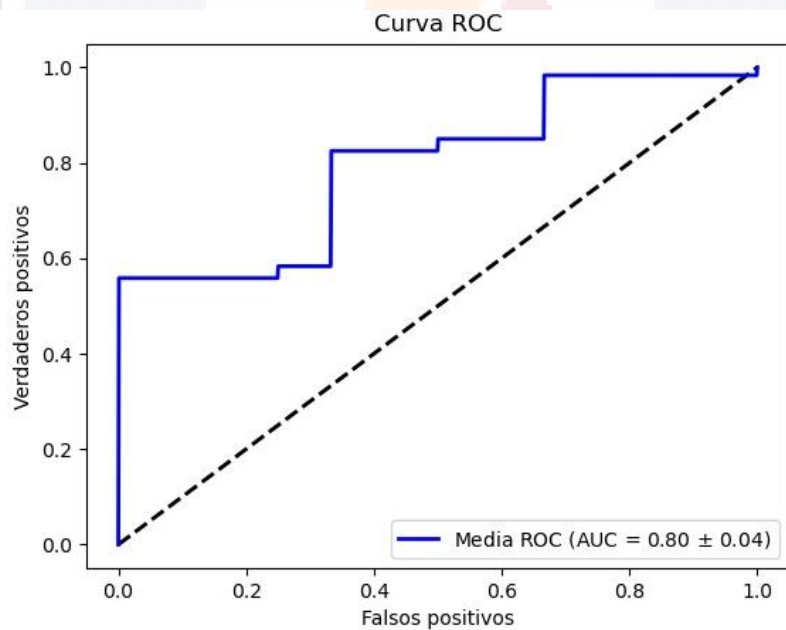


Figura 34 Curva ROC entre el grupo de Sanos (CG) y el grupo de Mialgia (MG) contra el grupo de Artralgia (AG).

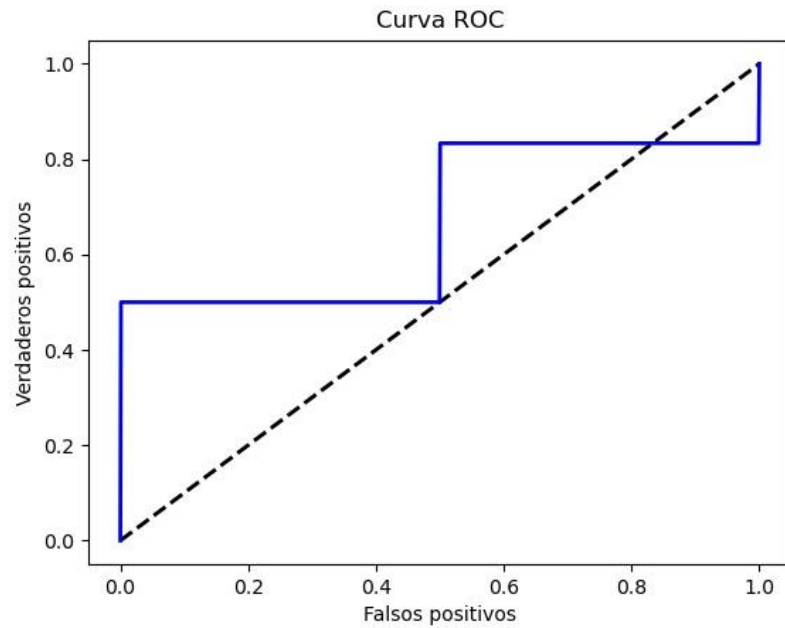


Figura 35 Curva ROC entre el grupo de Mialgia (MG) contra el grupo de Artralgia (AG).

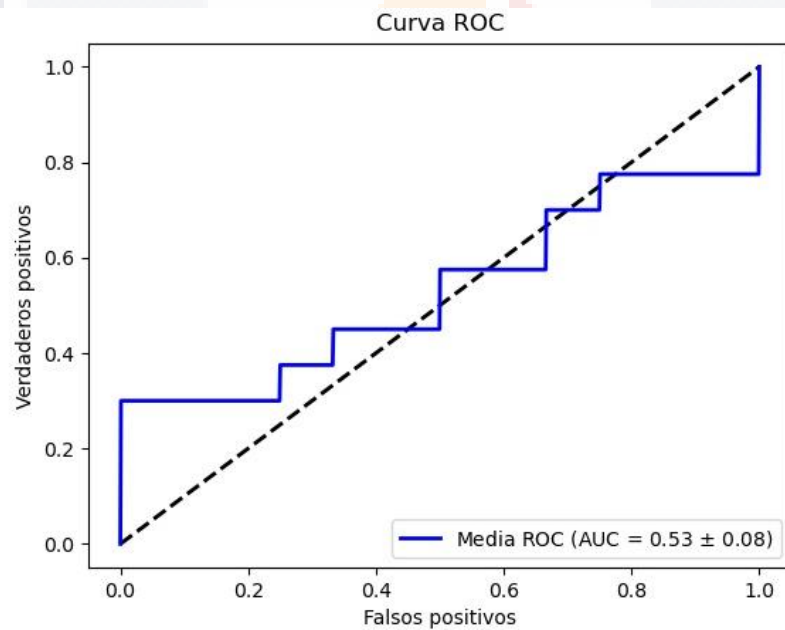


Figura 36 Curva ROC entre el grupo de Sanos (CG) y el grupo de Artralgia (AG) contra el grupo de Mialgia (MG).

De la Figura 37 a la Figura 41, se muestran las gráficas de la curva ROC con las 3 características resultantes del ANOVA que pertenecen al SVC. El rendimiento de los algoritmos es con kernel Lineal en las distintas subclasificaciones.

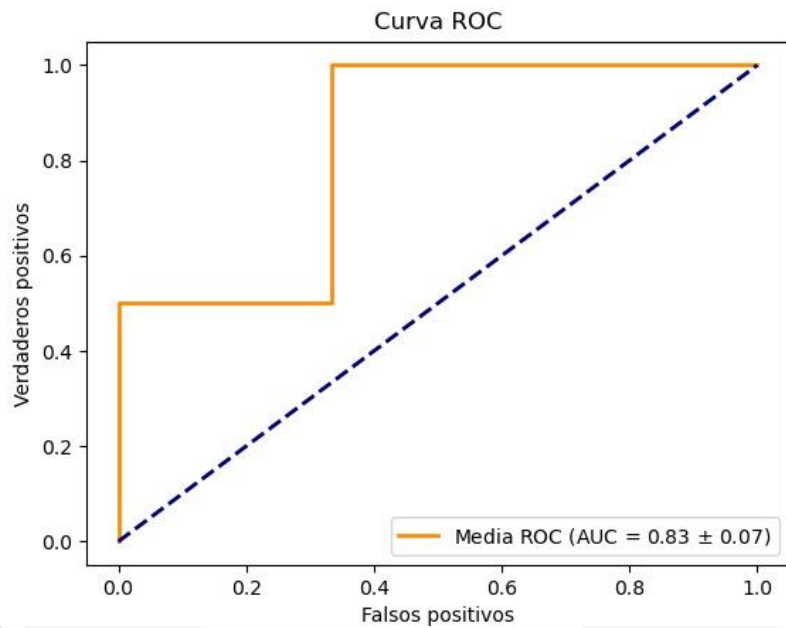


Figura 37 Curva ROC entre el grupo de Sanos (CG) contra el grupo de Mialgia (MG) contra el grupo de Artralgia (AG).

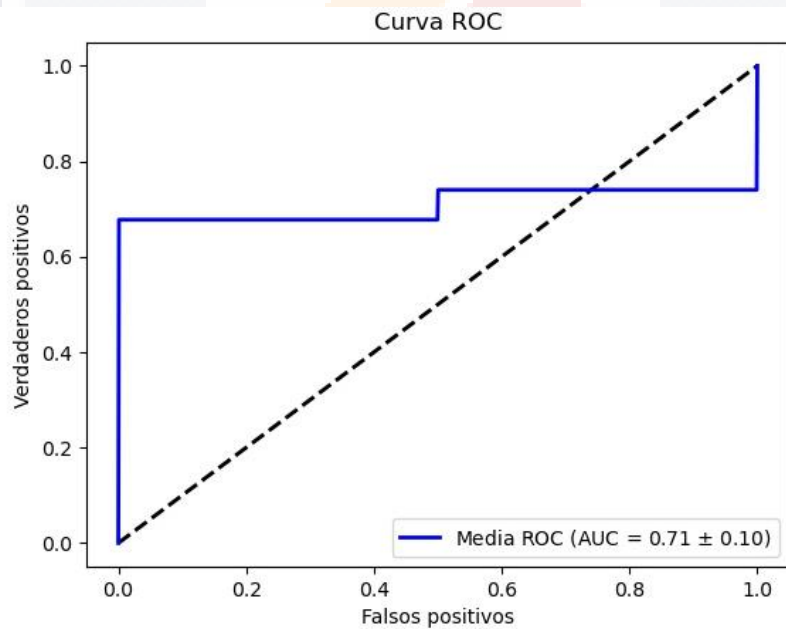


Figura 38 Curva ROC entre el grupo de Sanos (CG) contra el grupo de Enfermos (DG).

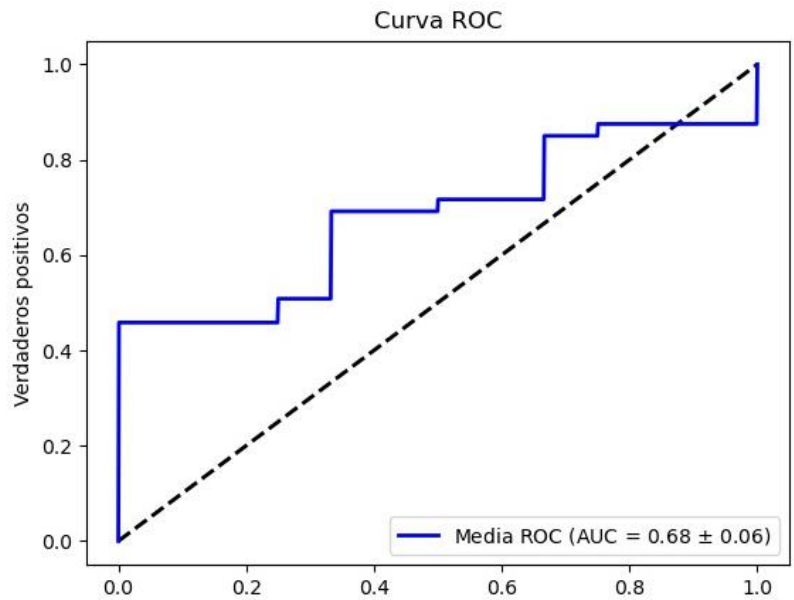


Figura 39 Curva ROC entre el grupo de Sanos (CG) y el grupo de Mialgia (MG) contra el grupo de Artralgia (AG).

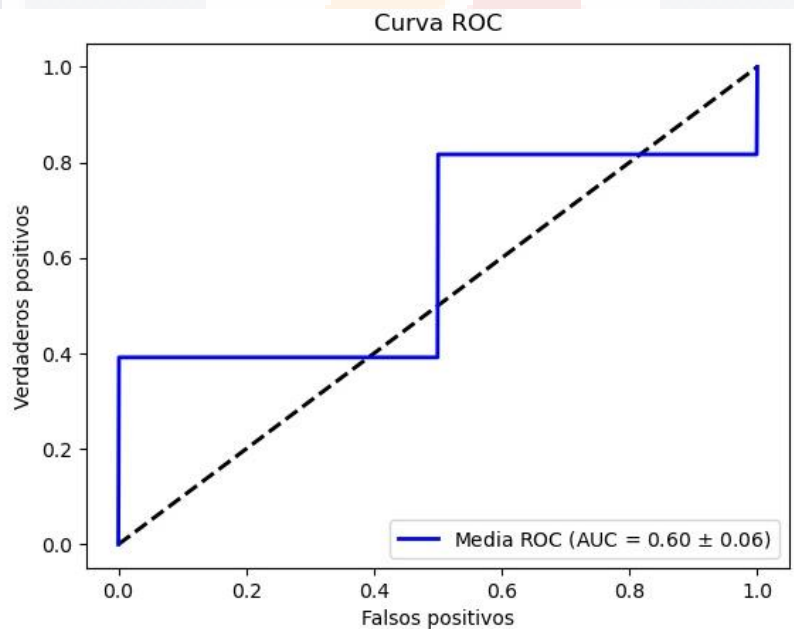


Figura 40 Curva ROC entre el grupo de Mialgia (MG) contra el grupo de Artralgia (AG).

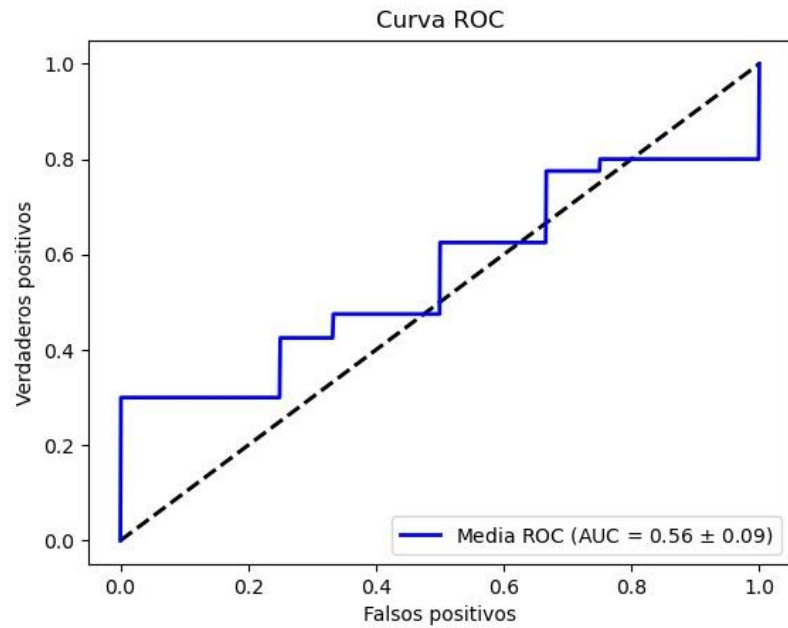
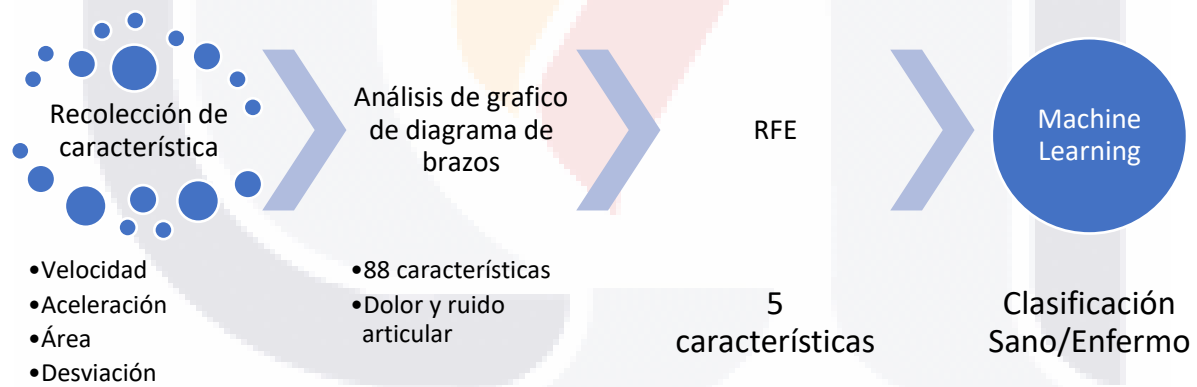


Figura 41 Curva ROC entre el grupo de Sanos (CG) y el grupo de Artralgia (AG) contra el grupo de Mialgia (MG).

La propuesta que se implementó para la clasificación de los trastornos temporomandibulares se muestra a continuación en diagrama de bloques para un mejor entendimiento del procedimiento:



DISCUSIÓN

Los resultados nos demostraron que el análisis cuantitativo de los movimientos mandibulares (Apertura/Cierre y Lateralidades) por medio de un sistema de visión computacional. Nos permite diferenciar a personas que poseen Mialgia de aquellas que presentan Artralgia y los pacientes Sanos. Esto se puede apreciar a partir de los resultados en la Tabla 18 en ambos apartados al igual que la Tabla 19 y Tabla 20.

El trabajo de tesis desarrollo abre la pauta a que este tipo de sistemas de visión computacional sean utilizados en la clínica odontoestomatológica como un apoyo en el diagnóstico de la ATM. Entre sus principales ventajas esta la asistencia al diagnóstico del paciente que reduce los posibles errores de paralaje, generados por la toma de medidas maxilares por parte del personal clínico. Además de que es un instrumento que reduciría en gran medida el tiempo de acción y con ello una respuesta oportuna en el tratamiento para el paciente. Lo cual se traduciría como una mejora en la calidad de vida del paciente.

Inclusive se tiene mejoras en el tiempo implementado para el diagnóstico de los TTM, ya que la aplicación del DC/TMD tiene un tiempo aproximado de 15 a 20 minutos, en comparación con la propuesta la cual dura 2 minutos en la ejecución de los movimientos. Asimismo, el costo económico de la propuesta es barato en comparación con las herramientas utilizadas por Cunha *et al.* [14], ya que el costo de la cámara fue alrededor de \$50,000 MXN más el costo del equipo de cómputo. Con lo cual se tiene un sistema portátil que puede ser transportado con relativa facilidad, salvo por la calibración que se debe de realizar en cada ocasión que se realice el estudio.

Esto nos genera la apertura a mayores investigaciones, donde se incluya el movimiento de protrusión/retrusión del maxilar inferior.

En previos estudios se ha demostrado que utilización de los sistemas de visión computacional es de gran apoyo ademas de ser mínimamente invasivo, puesto que se utilizan marcadores para la detección de los movimientos como bien lo menciona Calil *et al.*[9], Furtado *et al.* [81] y Mantelatto *et al.* [50]. Recientemente se hizo el lanzamiento de un dispositivo de tecnología 4D, que realiza la captura y registro del movimiento mandibular, así como la oclusión dinámica. Sin embargo, el precio de este dispositivo asciende a los \$40,000 USD más impuestos, la ventaja es la mínima invasión [95].

Lo encontrado en el estudio realizado por Cunha *et al.* [14] la desviación de la mandíbula sobre el eje X en los movimientos de apertura y cierre son de gran importancia en el diagnóstico y distinción de los TTM. Esto lo menciona Lemoine *et al.*[15], Mantelatto *et al.*[50], Naeije *et al.*[16] y Jeon *et al.*[13], ocurre por un desarreglo discal en cualquiera de las dos articulaciones. Es decir, los cóndilos se mueven asimétricamente y sin coordinación. Asimismo, mencionan que, debido al

movimiento del cóndilo en el movimiento de apertura y cierre se modifican las limitaciones ligamentarias, capsulares y musculares alterando la amplitud durante los movimientos repetitivos. Caso contrario de lo que sucede en los movimientos de protrusión y lateralidades.

Se ha observado que la presencia de ruido articular durante el movimiento de apertura y cierre está asociada con la desviación o limitación del maxilar [50], esto se debe al desplazamiento del disco anterior y es considerado como una de las principales causas de poseer TTM [13]. De acuerdo con lo demostrado en Calil *et al.*[9], tuvimos un mayor grado de sensibilidad y especificidad en el grupo de control o grupo sano, con un kernel lineal, en lugar de un kernel de tipo poligonal utilizado por ellos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, las características con mayor importancia teniendo en cuenta las subclasificaciones, hacen referencia sobre el comportamiento de los TTM durante los movimientos realizados por el paciente. Es decir, para distinguir a un paciente sano de uno que padece alguna patología de la ATM son de gran relevancia la presencia de dolor y chasquido articular característica 88 y 89, respectivamente. Mientras que la media de la desviación ($dx^{(oc)}$) sobre el eje X en el movimiento de apertura y cierre hace una diferencia entre pacientes que poseen artralgia de los sanos y pacientes con mialgia, característica 34. Así mismo la razón de cambio de la velocidad ($\frac{\sum_{t \in t_1} x_{n-1}^{(tat)}}{\sum_{t \in t_2} x_2}$) respecto al eje X en el movimiento de lateralidades puede distinguir a un paciente con artralgia de un con mialgia, características 52. En el caso de la clasificación de Mialgia vs Artralgia, los mejores resultados se obtuvieron con base en la media de la aceleración ($\bar{y}^{(tat)}$) respecto al eje Y en el movimiento de lateralidades, características 67.

Por otra parte, se demuestra que la implementación de la inteligencia artificial como la máquina de soporte vectorial. Es de gran ayuda en el manejo de base de datos, así como evaluar y darle una aplicación. En el apoyo al área clínica para poder diagnosticar a aquellos pacientes sanos de los que poseen TTM, con asertividad y confianza tanto para el paciente y el clínico a cargo.

Estudios concuerdan en que la velocidad funcional de los movimientos de los pacientes que padecen algún TTM, se ve reducida en funciones estomatognáticas en comparación con individuos asintomáticos [51], [96]. Así pues, entre mayor sea el número de repeticiones aumentara la velocidad para realizar los movimientos, además de no encontrar diferencia significativa en la velocidad de cierre y apertura como lo reporta Fuentes *et al.* [62]. El uso de la aceleración en la evaluación de los movimientos mandibulares es útil para diferenciar funcionalidad de la mandíbula, como lo describe Minami *et al.* [96].

En comparación con Cunha *et al.* [14], nuestra contribución es la utilización de la presencia de dolor y chasquido articular, así como la razón de cambio de la

velocidad y la media de la aceleración. En cambio, utiliza el valor de la velocidad de los movimientos de lateralidades, la desviación en el movimiento de lateralidades sobre el eje X durante el cierre, la desviación lateral sobre el eje X en el movimiento protrusión. También debemos de destacar que en la propuesta hicimos uso del DC/TMD el cual contribuye a una mayor precisión en el diagnóstico de los TTM, en lugar de usar el RDC/TMD.

De acuerdo con los resultados en la Tabla 18, el algoritmo de SVM alimentado con las características (34, 52, 67, 88 y 89) mediante el kernel lineal mostró que existe discrepancia entre las diferentes subclasificaciones. El algoritmo reportó en porcentaje un 93% de sensibilidad y 93% de especificidad. Además, mostró una especificidad del 96% para poder diferenciar a los pacientes con Mialgia de los pacientes Sanos y con Artralgia. Mientras que en el caso de la utilización únicamente de las 3 características del SVC tiene un porcentaje 90% > en especificidad para diferenciar a los grupos con algún TTM, es decir más pacientes sanos serán diagnosticados adecuadamente.

En caso de la Tabla 19, podemos observar que la existe una mayor diferenciación y una mejor clasificación de los pacientes con Mialgia de aquellos que poseen Artralgia, esto se observa en la existencia de una especificidad en porcentaje del 95% en la comparación del CG + AG vs MG. Además de observar un 83% de sensibilidad al comparar al MG vs AG. Esto mismo se puede observar en la Tabla 19 b), con las características que pertenecen al SVC.

En la Tabla 20, observamos un comportamiento similar a la Tabla 19. Los resultados mostrados con la implementación del kernel Polinomial, mediante las 5 y 3 características.

El tener un sistema de clasificación de pacientes con TTM efectivo, con base en visión computacional ayudará hacer más eficiente el diagnóstico clínico. Esto se traduce en una mejora en la calidad de vida del paciente, ya que se diagnosticaría con mayor rapidez y sin generar molestias o incomodidad durante el proceso. Esto en diferencia del actual estandar de oro para el diagnóstico de estas alteraciones, ya que en promedio un personal capacitado llega a tardar entre 15 o 20 minutos. Aunado a ello se puede presentar molestias y generar dolor durante la aplicación de este, ya que se requiere palpar y ejercer fuerza de hasta 1 kilo en zonas de la cara y de la ATM.

Una ventaja sobre el uso de sistemas de visión en la práctica clínica es su practicidad y la poca incomodidad que presenta el paciente. Nuestra contribución al estado de arte es que el paciente se encontraba libre, es decir no se contaba con dispositivos de sujeción. Además, debemos mencionar que los marcadores colocados para la adquisición de los movimientos mandibulares eran colocados de manera mínimamente invasiva y de una disposición que no generaba incomodidad durante la ejecución de los movimientos, en caso contrario a como se hace actualmente en la literatura [14], [97].

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Naeije *et al.* [16] y Lemoine *et al.* [15] en el cual utilizaron OKAS-3D que consta de una pantalla de tubo de rayos catódicos, una lente frente a la pantalla y una fotocélula circular sensible a la luz colocada en el campo de imagen de la lente. Bianchini *et al.* [98] y Hobo *et al.* [99] hacían uso de un equipo de electrognatografía, en el cual se coloca un auricular en el paciente y con un imán dentro de sus dientes frontales inferiores, Fuentes *et al.* [62] utilizó un electroarticulograma magnético, Kim *et al.* [100] hizo uso de un analizador de movimiento mandibular y Kwon *et al.* [31] utilizó marcadores no retroreflectivos en los dientes y una tomografía computarizada de haz cónico.

El uso de la Inteligencia Articular sobre imágenes en la aplicación para la clasificación de TTM, fue utilizado por Haghnegahdar *et al.* [101] utilizaron imágenes obtenidas por CBCT obtuvieron un 94.7% de sensibilidad y 90.15% de especificidad, para poder diferenciar a pacientes con TTM de aquellos sanos, por medio de un algoritmo KNN (*K nearest neighbor*). Utilizaron la curva ROC para evaluar la hipótesis planteada.

Esta técnica propone una clasificación automática de los pacientes que poseen un TTM de aquellos pacientes sanos. Este tipo de clasificación es posible realizarla gracias a la posibilidad de utilizar nuevas características, que no solo sean relacionadas con las máximas de los movimientos mandibulares utilizados en el DC/TMD. Los aparatos en conjunto con la tecnología pueden describir e inclusive abren la pauta para diagnosticar enfermedades en menor tiempo.

Las limitaciones presentadas durante la ejecución de la investigación, fue la eliminación de las personas que presentaran patologías como la acatisia, ya que incapacita a la persona para permanecer quieto o sentado, con tendencia compulsiva a desplazarse. El dispositivo no considera las proporciones de la ATM de pacientes infantiles.

La cantidad de participantes en el grupo de sanos fue una limitante, además que el número de participantes masculinos fue pequeño contando únicamente con el 29% del total.

CONCLUSIONES

Con esto se confirma la importancia del uso de la variable C34, la cual es utilizada por Calil *et al.* [9]. Que en conjunto con las variables C52 y C67, y las variables C88 y C89. Donde las últimas variables no se obtienen del sistema de visión, sin embargo, son características fáciles de evaluar en la clínica.

Además, el artículo describe un nuevo método de seguimiento del movimiento mandibular usando un SVC en conjunto de marcadores ArUco. Es un método útil en la adquisición de movimiento mandibulares en comparación con algunas otras técnicas usando SVC discutidas previamente. Aunado a ello la reproducibilidad de la propuesta utilizada es sencilla y barata, ya que los softwares implementados para el desarrollo del algoritmo son software libre.

El principal objetivo es la implementación de un asistente de diagnóstico para Trastornos Temporomandibulares al personal del área médica involucrado en la detección y tratamiento de estos. Encontrando que el análisis cuantitativo de los movimientos mandibulares (Apertura/Cierre y Lateralidades) por medio de un sistema de visión computacional. Nos permite diferenciar a personas que poseen Mialgia de aquellas que presentan Artralgia y los pacientes Sanos. Además de encontrar características que nos ayuden a diferenciar entre todos los subgrupos.

REFERENCIAS

- [1] D. ROBERT L. GAUER, MD, and MICHAEL J. SEMIDEY, “Diagnosis and Treatment of Temporomandibular Disorders | Enhanced Reader,” in *Womack Army Medical Cente*, 2015, pp. 91(6); 378–386.
- [2] A. A. Terán, A. T. Fleitas, and L. Arellano, “Efectividad de dos tipos de férulas oclusales sobre síntomas y signos de trastornos temporo mandibulares,” *Revista Odontológica de Los Andes*, vol. 6, no. 1, pp. 33-41–41, 2011.
- [3] “Prevalence of TMJD and its Signs and Symptoms | Data & Statistics | National Institute of Dental and Craniofacial Research.” <https://www.nidcr.nih.gov/research/data-statistics/facial-pain/prevalence> (accessed Mar. 27, 2020).
- [4] K. Haruka *et al.*, “Sequential Analysis of Head Movement During,” *THE JOURNAL OF CRANIOMANDIBULAR PRACTICE*, pp. 272–279, 2012.
- [5] J. H. Stone, G. C. Nelson, and S. M. Fitzpatrick, “Temporomandibular joint osteoarthritis at Chelechol ra Orrak, Palau,” *International Journal of Paleopathology*, vol. 28, pp. 20–31, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.ijpp.2019.12.001.
- [6] R. P. Donahue, J. C. Hu, and K. A. Athanasiou, “Remaining Hurdles for Tissue-Engineering the Temporomandibular Joint Disc,” *Trends in Molecular Medicine*, vol. 25, no. 3. Elsevier Ltd, pp. 241–256, Mar. 01, 2019. doi: 10.1016/j.molmed.2018.12.007.
- [7] R. de Leeuw, *American Academy of Orofacial Pain Guidelines for Assessment, Diagnosis, and Management*, vol. 4.
- [8] B. Mitchell, C. Cummins, and R. LeFebvre, “Temporomandibular Joint Disorders (TMD): A Clinical Assessment,” *UWS Clinic*, pp. 1–46, 2015.
- [9] B. C. Calil *et al.*, “Identification of arthropathy and myopathy of the temporomandibular syndrome by biomechanical facial features,” *BioMedical Engineering Online*, vol. 19, no. 1, pp. 1–19, 2020, doi: 10.1186/s12938-020-00764-5.
- [10] A. Loría Chami, R. Balcázar Vázquez, and K. Sánchez Vargas, “Utilidad de la resonancia magnética para el diagnostic de disfunción de la articulación temporomandibular,” *Gaceta Medica de Mexico*, vol. 150, pp. 255–258, 2014.
- [11] W. Ceusters, C. Nasri-Heir, D. Alnaas, B. E. Cairns, A. Michelotti, and R. Ohrbach, “Perspectives on next steps in classification of oro-facial pain - Part 3: Biomarkers of chronic oro-facial pain - from research to clinic,” *Journal of Oral Rehabilitation*, vol. 42, no. 12. Blackwell Publishing Ltd, pp. 956–966, Dec. 01, 2015. doi: 10.1111/joor.12324.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- [12] T. Dostalova, V. Hlavac, T. Pajdla, R. Sara, and V. Smutny, "Three computer vision applications in dentistry," in *Medical Imaging 1994: Physiology and Function from Multidimensional Images*, May 1994, vol. 2168, pp. 416–424. doi: 10.1117/12.174415.
- [13] K. J. Jeon *et al.*, "Quantitative analysis of the mouth opening movement of temporomandibular joint disorder patients according to disc position using computer vision: A pilot study," *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, vol. 12, no. 3, pp. 1909–1918, 2022, doi: 10.21037/qims-21-629.
- [14] D. v. da Cunha *et al.*, "Real-time three-dimensional jaw tracking in temporomandibular disorders," *Journal of Oral Rehabilitation*, vol. 44, no. 8, pp. 580–588, 2017, doi: 10.1111/joor.12521.
- [15] J. J. Lemoine, J. J. Xia, C. R. Andersen, J. Gateno, W. Buford, and M. A. K. Liebschner, "Geometry-Based Algorithm for the Prediction of Nonpathologic Mandibular Movement," *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, vol. 65, no. 12, pp. 2411–2417, 2007, doi: 10.1016/j.joms.2007.05.011.
- [16] M. Naeije and N. Hofman, "Biomechanics of the human temporomandibular joint during chewing," *Journal of Dental Research*, vol. 82, no. 7, pp. 528–531, 2003, doi: 10.1177/154405910308200708.
- [17] J. López López, E. Chimenos Küstner, A. Blanco Carrión, X. Reselló Llabrés, and E. Jané Salass, "Diagnóstico por la imagen de los trastornos de la articulación craneomandibular," *Avances en Odontostomatología*, vol. 21, no. 2, pp. 71–88, 2005, doi: 10.4321/s0213-12852005000200003.
- [18] M. Morón Araújo, "El Estrés y Bruxismo por COVID-19 como Factores de Riesgo en la Enfermedad Periodontal," vol. 15, no. 2, pp. 309–314, 2021.
- [19] K. L. Scrivani SJ, Keith DA, "Temporomandibular disorders," *N Engl J Med*, vol. 359, no. 25, pp. 2693–2705, 2008.
- [20] M. K. Murphy, R. F. MacBarb, M. E. Wong, and K. A. Athanasiou, "Temporomandibular Disorders: A Review of Etiology, Clinical Management, and Tissue Engineering Strategies," *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, vol. 28, no. 6, pp. e393–e414, 2013, doi: 10.11607/jomi.te20.
- [21] T. List and R. H. Jensen, "Temporomandibular disorders: Old ideas and new concepts," *Cephalalgia*, vol. 37, no. 7. SAGE Publications Ltd, pp. 692–704, Jun. 01, 2017. doi: 10.1177/0333102416686302.
- [22] A. P. Heise, D. M. Laskin, and A. S. Gervin, "Incidence of temporomandibular joint symptoms following whiplash injury," *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, vol. 50, no. 8, pp. 825–828, Aug. 1992, doi: 10.1016/0278-2391(92)90273-3.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- [23] H. Salé, F. Bryndahl, and A. Isberg, "A 15 year follow-up of temporomandibular joint symptoms and magnetic resonance imaging findings in whiplash patients: prospective, controlled study," *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, vol. 117, no. 4, pp. 522–532, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.oooo.2014.01.020.
- [24] A. I. MEJIA PICHARDO, P. A. SÁNCHEZ REYNA, V. E. MUHLIA DELGADILLO, and J. F. PLIEGO MAÑÓN, "Prevalencia de alteraciones de la articulación Temporomandibular en pacientes atendidos en la Facultad de Odontología, durante el periodo 2018B," Universidad Autónoma del Estado de México, 2019.
- [25] E. R. Rodríguez-Robledo *et al.*, "Prevalencia de Bruxismo y Trastornos Temporomandibulares Asociados en una Población de Escolares de San Luis Potosí, México," *International journal of odontostomatology*, vol. 12, no. 4, pp. 382–387, 2018, doi: 10.4067/s0718-381x2018000400382.
- [26] O. Lescas Méndez *et al.*, "Trastornos temporomandibulares: Complejo clínico que el médico general debe conocer y saber manejar. Cátedra especial 'Dr. Ignacio Chávez,'" *Rev. Fac. Med. UNAM*, vol. 55, no. 1, pp. 4–11, 2012.
- [27] I. A. Espinosa De Santillana, "Alteraciones posturales frecuentes en pacientes con diferentes tipos de trastornos temporomandibulares," *Revista de Salud Pública*, vol. 20, no. 3, pp. 384–389, 2018, doi: 10.15446/rsap.v20n3.53529.
- [28] M. H. Moreno Rojas, P. Iara Mendieta, and A. F. Meléndez Ocampo, "Perfil clínico epidemiológico del trastorno temporomandibular en mexicanos con maloclusión," *Revista Mexicana de Ortodoncia*, vol. 3, no. 2, pp. 79–83, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.rmo.2016.03.021.
- [29] N. Su, A. J. van Wijk, C. M. Visscher, F. Lobbezoo, and G. J. M. G. van der Heijden, "Diagnostic value of ultrasonography for the detection of disc displacements in the temporomandibular joint: a systematic review and meta-analysis," *Clinical Oral Investigations*, vol. 22, no. 7, pp. 2599–2614, 2018, doi: 10.1007/s00784-018-2359-4.
- [30] U. Soboļeva, L. Lauriņa, and A. Slaidiņa, "Jaw tracking devices--historical review of methods development. Part I.," *Stomatologija / issued by public institution "Odontologijos studija" ... [et al.]*, vol. 7, no. 3, pp. 67–71, 2005.
- [31] J. H. Kwon, S. Im, M. Chang, J. E. Kim, and J. S. Shim, "A digital approach to dynamic jaw tracking using a target tracking system and a structured-light three-dimensional scanner," *Journal of Prosthodontic Research*, vol. 63, no. 1, pp. 115–119, 2019, doi: 10.1016/j.jpor.2018.05.001.
- [32] R. M. Gutiérrez, "Relación entre los diagnósticos físicos de los trastornos temporomandibulares (eje I) y el aspecto psicosocial (eje II) según el criterio

de diagnóstico para los,” no. eje I, p. 181, 2016, [Online]. Available: <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/4637>

- [33] “Estrés | Centro de Opinión Pública UVM.” <https://opinionpublica.uvm.mx/estudios/estres> (accessed May 25, 2021).
- [34] X. Qu and X. D. Zhou, “Psychological intervention for patients with oral disease during the pandemic period of COVID-19.,” *Chinese journal of stomatology*, vol. 55, no. 4, pp. 235–240, Apr. 2020, doi: 10.3760/cma.j.cn112144-20200213-00053.
- [35] M. C. M. E. Cabrera Villalobos Yanelys, Álvarez Llanes Marina, Gómez Mariño Mercedes, “Oclusión y estrés en el síndrome dolor-disfunción temporomandibular: presentación de un paciente,” *AMC*, vol. 13, no. 3, 2009, [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-02552009000300018
- [36] K. Schneider, R. F. Zernicke, and G. Clark, “Modeling of Jaw-Head-Neck Dynamics during Whiplash,” *Journal of Dental Research*, vol. 68, no. 9, pp. 1360–1365, Sep. 1989, doi: 10.1177/00220345890680091401.
- [37] A. Sojka, M. Zarowski, B. Steinborn, W. Hedzelek, B. Spychala, and B. Dorocka-Bobkowska, “Temporomandibular disorders in adolescents with headache,” *Advances in Clinical and Experimental Medicine*, vol. 27, no. 2, pp. 193–199, Feb. 2018, doi: 10.17219/acem/64945.
- [38] S. F. Dworkin, “Research diagnostic criteria for temporomandibular disorders : review, criteria, examinations and specifications,” *Journal of Craniomandibular Disorders*, vol. 6, pp. 301–355, 1992.
- [39] R. P. Lewis, P. H. Buschang, and G. S. Throckmorton, “Sex differences in mandibular movements during opening and closing,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 120, no. 3, pp. 294–303, 2001, doi: 10.1067/mod.2001.115612.
- [40] X. Alomar *et al.*, “Anatomy of the Temporomandibular Joint,” *Seminars in Ultrasound, CT and MRI*, vol. 28, no. 3, pp. 170–183, Jun. 2007, doi: 10.1053/j.sult.2007.02.002.
- [41] M. Grau León, Ileana; Fernández Lima, Katia; González, Gladys; Osorio Nunez, “Articulación temporomandibular: diagnóstico y tratamiento (II),” *Rev. Cubana Estomatol*, p. 42(3), 2005, Accessed: Feb. 18, 2020. [Online]. Available: <https://www.elsevier.es/es-revista-seminarios-fundacion-espanola-reumatologia-274-pdf-S1577356605744778>

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- [42] P. del Palomar, J. Cegoñino, L. Arranz, D. Vicente, and M. Doblaré, “Simulación por elementos finitos de la articulación temporomandibular,” *Biomecánica*, vol. 11, pp. 10–22, 2003.
- [43] A. B. Marín Fernández, *Evaluación de la viabilidad de los condrocitos de la articulación temporomandibular para su utilización en ingeniería tisular maxilofacial*. Universidad de Granada, 2012. Accessed: Mar. 26, 2020. [Online]. Available: http://digibug.ugr.es/handle/10481/23500#.WM_ikt11_IU
- [44] C. B. S. 4. 0 Osmosis, “ATM,” *Wikimedia Commons*. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0> (accessed Apr. 23, 2021).
- [45] C. B. Meloto *et al.*, “Clinical predictors of persistent temporomandibular disorder in people with first-onset temporomandibular disorder: A prospective case-control study,” *Journal of the American Dental Association*, vol. 150, no. 7, pp. 572–581, 2019, doi: 10.1016/j.adaj.2019.03.023.
- [46] S. Liébana Sánchez-Toscano Diplomada en Fisioterapia, “Disfunción temporomandibular en el latigazo Temporomandibular dysfunction in Whiplash Injury,” *Universidad San Pablo CEU*, 2008.
- [47] T. Hayashi, J. Ito, J. I. Koyama, and K. Yamada, “The accuracy of sonography for evaluation of internal derangement of the temporomandibular joint in asymptomatic elementary school children: Comparison with MR and CT,” *American Journal of Neuroradiology*, vol. 22, no. 4, pp. 728–734, 2001.
- [48] R. Fuentes *et al.*, “A New Tridimensional Insight into Geometric and Kinematic Characteristics of Masticatory Cycles in Participants with Normal Occlusion,” *BioMed Research International*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/2527463.
- [49] T. Brown, “Mandibular movements.,” *Monogr Oral Sci*, vol. 4, pp. 126–150, 1975, doi: 10.1159/000397870.
- [50] R. Mantelatto Andrade *et al.*, “Reliability in Mandibular Movement Evaluation Using Photogrammetry in Patients With Temporomandibular Disorders,” *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, vol. 42, no. 4, pp. 267–275, 2019, doi: 10.1016/j.jmpt.2018.11.008.
- [51] K. Gawriolek, M. Gawriolek, M. Komosa, P. R. Piotrowski, and S. S. Azer, “Kinematic Modeling of Normal Voluntary Mandibular Opening and Closing Velocity-Initial Study,” *Journal of Prosthodontics*, vol. 24, no. 4, pp. 279–286, 2015, doi: 10.1111/jopr.12212.
- [52] Y. M. Gonzalez, C. S. Greene, and N. D. Mohl, “Technological Devices in the Diagnosis of Temporomandibular Disorders,” *Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America*, vol. 20, no. 2, pp. 211–220, 2008, doi: 10.1016/j.coms.2007.12.006.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- [53] G. Barbieri Petrelli, J. Flores Guillén, M. Escribano Bermejo, and N. Discepoli, "Actualización en radiología dental. Radiología convencional vs digital," *Avances en Odontoestomatología*, vol. 22, no. 2, pp. 131–139, 2006, doi: 10.4321/s0213-12852006000200005.
- [54] E. Schiffman and R. Ohrbach, "Executive summary of the Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders for clinical and research applications," *Journal of the American Dental Association*, vol. 147, no. 6, pp. 438–445, 2016, doi: 10.1016/j.adaj.2016.01.007.
- [55] E. Schiffman *et al.*, "Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders (DC/TMD) for Clinical and Research Applications: Recommendations of the International RDC/TMD Consortium Network* and Orofacial Pain Special Interest Group†," *Journal of Oral & Facial Pain and Headache*, vol. 28, no. 1, pp. 6–27, Jan. 2014, doi: 10.11607/jop.1151.
- [56] D. Z. R. Díaz, C. E. E. Müller, and M. B. D. Gavião, "Ultrasonographic study of the temporomandibular joint in individuals with and without temporomandibular disorder," *Journal of Oral Science*, vol. 61, no. 4, pp. 539–543, 2019, doi: 10.2334/josnusd.18-0278.
- [57] J. Leskinen *et al.*, "Diagnostic criteria for temporomandibular disorders (DC/TMD): interexaminer reliability of the Finnish version of Axis I clinical diagnoses," *Journal of Oral Rehabilitation*, vol. 44, no. 7, pp. 493–499, 2017, doi: 10.1111/joor.12516.
- [58] S. Madhavan, M. Dhanraj, and A. R. Jain, "Methods of recording mandibular movements - A review," *Drug Invention Today*, vol. 10, no. 7, pp. 1254–1259, 2018.
- [59] J. A. Salomon, B. D. Waysenson, and B. D. Warshaw, "Computer-monitored radionuclide tracking of three-dimensional mandibular movements. Part II: Experimental setup and preliminary results-Posselt diagram," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 41, no. 4, pp. 463–469, 1979, doi: 10.1016/0022-3913(79)90045-3.
- [60] J. K. Leader, J. R. Boston, T. E. Rudy, C. M. Greco, and H. S. Zaki, "Use of sound and jaw movement patterns to characterize patients with temporomandibular disorders," *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*, vol. 4, no. C, pp. 1729–1732, 1997, doi: 10.1109/iembs.1997.757056.
- [61] N. Jara, J. L. Abad, J. Navarro, and Á. Page, "Validación de los marcadores ArUco para el análisis de movimientos humanos," pp. 26–35, 2019, doi: 10.4995/ceabioing.2019.10029.

- [62] R. Fuentes, P. Navarro, A. Curiqueo, and N. E. Ottone, "Determination of mandibular border and functional movement protocols using an electromagnetic articulograph (EMA).," *Int J Clin Exp Med*, vol. 8, no. 11, pp. 19905–16, 2015, Accessed: Sep. 27, 2020. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26884903>
- [63] B. C. Calil *et al.*, "Identification of arthropathy and myopathy of the temporomandibular syndrome by biomechanical facial features," *BioMedical Engineering Online*, vol. 19, no. 1, pp. 1–18, 2020, doi: 10.1186/s12938-020-00764-5.
- [64] L. E. Sucar and G. Gómez, "Vision Computacional," *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica*, p. 185, 2011.
- [65] A. Basu and X. Li, *Computer Vision: Systems, Theory and Applications*. World Scientific, 1993.
- [66] K. V Kale, S. C. Mehrotra, R. R. Manza, and R. R. Manza, *Computer Vision and Information Technology: Advances and Applications*. I.K. International Publishing House Pvt. Limited, 2010.
- [67] "OpenCV: OpenCV modules." <https://docs.opencv.org/4.x/index.html> (accessed Feb. 22, 2022).
- [68] "OpenCV: Camera Calibration and 3D Reconstruction." https://docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group__calib3d.html (accessed Feb. 22, 2022).
- [69] "OpenCV: Camera Calibration." https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html (accessed Apr. 23, 2022).
- [70] S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas, and R. Medina-Carnicer, "Generation of fiducial marker dictionaries using Mixed Integer Linear Programming," *Pattern Recognition*, vol. 51, pp. 481–491, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.patcog.2015.09.023.
- [71] F. Pedregosa *et al.*, "Scikit-learn: Machine Learning in Python," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, no. 85, pp. 2825–2830, 2011, [Online]. Available: <http://jmlr.org/papers/v12/pedregosa11a.html>
- [72] G. Vallejo *et al.*, "Pruebas robustas para modelos ANOVA de dos factores con varianza heterogéneas," *Métodos Estadísticos*, vol. 31, 2010.
- [73] Josef. Seabold. Skipper. Perktold, "Statsmodels: Econometric and statistical modeling with python.," *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 2010.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- [74] N. J. Nilsson, "INTRODUCTION TO MACHINE LEARNING AN EARLY DRAFT OF A PROPOSED TEXTBOOK Department of Computer Science," *Machine Learning*, vol. 56, no. 2, pp. 387–99, 2005.
- [75] "RPubs - Máquinas de Vector Soporte." https://rpubs.com/Cristina_Gil/SVM (accessed Mar. 04, 2022).
- [76] T. W. Nattkemper *et al.*, "Evaluation of radiological features for breast tumour classification in clinical screening with machine learning methods," *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 34, no. 2, pp. 129–139, 2005, doi: 10.1016/j.artmed.2004.09.001.
- [77] R. F. Chang, W. J. Wu, W. K. Moon, Y. H. Chou, and D. R. Chen, "Support vector machines for diagnosis of breast tumors on US images," *Academic Radiology*, vol. 10, no. 2, pp. 189–197, 2003, doi: 10.1016/S1076-6332(03)80044-2.
- [78] R. F. Chang, W. J. Wu, W. K. Moon, and D. R. Chen, "Improvement in breast tumor discrimination by support vector machines and speckle-emphasis texture analysis," *Ultrasound in Medicine and Biology*, vol. 29, no. 5, pp. 679–686, 2003, doi: 10.1016/S0301-5629(02)00788-3.
- [79] É. D. Fabian Pedregosa, Gaël Varoquaux, Alexandre Gramfort, Vincent Michel, Bertrand Thirion, Olivier Grisel, Mathieu Blondel, Peter Prettenhofer, Ron Weiss, Vincent Dubourg, Jake Vanderplas, Alexandre Passos, David Cournapeau, Matthieu Brucher, Matthieu Perrot, "Scikit-learn: Machine Learning in Python," *Environmental Health Perspectives*, vol. 127, no. 9, pp. 2825–2830, 2019, doi: 10.1289/EHP4713.
- [80] IDS Imaging Development System GmbH, "IDS Software Suite 4.95.1." <https://es.ids-imaging.com/manuals/ids-software-suite/ueye-manual/4.95.1/en/index.html> (accessed Feb. 23, 2022).
- [81] D. A. Furtado, A. A. Pereira, A. de O. Andrade, D. P. B. Junior, and M. R. da Silva, "A specialized motion capture system for real-time analysis of mandibular movements using infrared cameras," *BioMedical Engineering Online*, vol. 12, no. 1, p. 17, Feb. 2013, doi: 10.1186/1475-925X-12-17.
- [82] M. Baude, E. Hutin, and J. M. Gracies, "A Bidimensional System of Facial Movement Analysis Conception and Reliability in Adults," *BioMed Research International*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/812961.
- [83] F. Yuan *et al.*, "A method of three-dimensional recording of mandibular movement based on two-dimensional image feature extraction," *PLoS ONE*, vol. 10, no. 9, pp. 1–8, 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0137507.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- [84] P. Chuhuaicura, M. F. Lezcano, F. J. Dias, A. D. Fuentes, A. Arias, and R. Fuentes, "Mandibular border movements: The two envelopes of motion," *Journal of Oral Rehabilitation*, no. November, 2020, doi: 10.1111/joor.13124.
- [85] "Detrending a signal — Scipy lecture notes." https://scipy-lectures.org/intro/scipy/auto_examples/plot_detrend.html (accessed Feb. 16, 2022).
- [86] S. Siegler, R. Hayes, D. Nicolella, and A. Fielding, "A technique to investigate the three-dimensional kinesiology of the human temporomandibular joint," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 65, no. 6, pp. 833–839, 1991, doi: 10.1016/S0022-3913(05)80023-X.
- [87] I. L. Nielsen, T. Marcel, and D. Chun, "Patterns of Mandibular Movements in subjects with Craniomandibular Disorders," vol. 62.
- [88] U. Soboļeva, L. Lauriņa, and A. Slaidiņa, "Jaw tracking devices - historical review of methods development. Part I.," *Stomatologija Baltic Dental and Maxillofacial Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 67–71, 2005.
- [89] N. D. Mohl, W. D. McCall, J. P. Lund, and O. Plesh, "Devices for the diagnosis and treatment of temporomandibular disorders. Part I: Introduction, scientific evidence, and jaw tracking," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 63, no. 2, pp. 198–201, 1990, doi: 10.1016/0022-3913(90)90106-M.
- [90] M. Glaister, M. H. Stone, A. M. Stewart, M. Hughes, and G. L. Moir, "The reliability and validity of fatigue measures during short-duration maximal-intensity intermittent cycling.," *J Strength Cond Res*, vol. 18, no. 3, pp. 459–462, Aug. 2004, doi: 10.1519/1533-4287(2004)18.
- [91] J. Martín-Hernández, P. J. Marín, and A. J. Herrero, "Review of muscle hypertrophy mechanisms induced by resistance occlusive training [Revisión de los procesos de hipertrofia muscular inducida por el entrenamiento de fuerza oclusivo]," *Revista Andaluza de Medicina del Deporte*, vol. 4, no. 4, pp. 152–157, 2011, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84856466995&partnerID=40&md5=24fb1a0cff9edcec43a1f2404930d013>
- [92] H. A. le Thi, V. V. Nguyen, and S. Ouchani, "Gene selection for cancer classification using DCA," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 5139 LNAI, pp. 62–72, 2008, doi: 10.1007/978-3-540-88192-6_8.
- [93] G. Ansari, T. Ahmad, and M. Najmud, "Hybrid Filter – Wrapper Feature Selection Method for Sentiment Classification," *Arabian Journal for Science and Engineering*, no. 0123456789, 2019, doi: 10.1007/s13369-019-04064-6.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- [94] “La regresión logística: una herramienta versátil | Nefrología.” <https://www.revistanefrologia.com/es-la-regresion-logistica-una-herramienta-versatil-articulo-X0211699500035664> (accessed Mar. 04, 2022).
- [95] “MODJAW.” <https://www.modjaw.com/en/> (accessed Apr. 23, 2022).
- [96] I. Minami, N. Zhao, K. Oogai, T. Nemoto, T. Whittle, and G. M. Murray, “A comparison between jerk-cost derived from a jaw-tracking system with that from an accelerometer,” *Journal of Oral Rehabilitation*, vol. 38, no. 9, pp. 661–667, 2011, doi: 10.1111/j.1365-2842.2011.02200.x.
- [97] R. Missaka, L. K. Adachi, R. Tamaki, R. S. A. Shinkai, T. N. de Campos, and O. Horikawa, “Development of an experimental optoelectronic device to study the amplitude of mandibular movements,” *Brazilian Oral Research*, vol. 22, no. 2, pp. 151–157, 2008, doi: 10.1590/S1806-83242008000200010.
- [98] E. M. G. Bianchini, G. Paiva, and C. R. F. de Andrade, “Mandibular movement patterns during speech in subjects with temporomandibular disorders and in asymptomatic individuals,” *Cranio - Journal of Craniomandibular Practice*, vol. 26, no. 1, pp. 50–58, 2008, doi: 10.1179/crn.2008.007.
- [99] S. Hobo and S. Mochizuki, “A kinematic investigation of mandibular border movement by means of an electronic measuring system. Part I: Development of the measuring system,” *The Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 50, no. 3, pp. 368–373, 1983, doi: 10.1016/S0022-3913(83)80095-X.
- [100] J. E. Kim, J. H. Park, H. S. Moon, and J. S. Shim, “Complete assessment of occlusal dynamics and establishment of a digital workflow by using target tracking with a three-dimensional facial scanner,” *Journal of Prosthodontic Research*, vol. 63, no. 1, pp. 120–124, 2019, doi: 10.1016/j.jpor.2018.10.003.
- [101] A. A. Haghnegahdar, S. Kolahi, L. Khojastepour, and F. Tajeripour, “Diagnosis of tempromandibular disorders using local binary patterns,” *Journal of Biomedical Physics and Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 1–X, 2018, doi: 10.22086/jbpe.v0i0.577.

ANEXOS

A. CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA LOS PACIENTES DE LA INVESTIGACIÓN.

CARTA CONSENTIMIENTO INFORMADO

Título: PII19-1 Análisis Biomédico de la Disfunción Craneomandibular

Investigador principal: Dr. en E. Omar Gutiérrez Navarro

Investigadores: Dr. David Masuoka Ito; Dra. Gabriela Vilar Pineda; IB. Mónica Castillo Juárez.

Invitación al estudio: Se le invita a participar en el proyecto “Análisis Biomédico de la Disfunción Craneomandibular” para realizar un método de apoyo para el diagnóstico de pacientes con trastorno temporomandibular (alteraciones o dolor de la articulación de la mandíbula).

Explicación: Los trastornos de la articulación de la mandíbula son alteraciones caracterizadas por dolor en los músculos y elementos anatómicos que envuelven a dicha articulación. Ubicada entre el hueso temporal y la mandíbula o maxilar inferior, en cada lado de la cara cerca del conducto auditivo. Cuando la articulación temporomandibular se encuentra lesionada o inflamada conduce al dolor en el movimiento de apertura y cierre como es el masticar, se puede apreciar un clic, crujir y hacer estallar la mandíbula; además de presentar una inflamación nerviosa; dolores de cabeza, incluyendo migrañas; molienda de dientes (bruxismo) y en ocasiones la dislocación de la misma. Lo cual conlleva a una mala calidad de vida para el paciente, además de una mala alimentación debido a que el paciente no quiera comer ni hacer movimientos para no generar dolor.

- I) Se me ha informado que se realizará la aplicación de un cuestionario, además de una prueba de seguimiento por visión máquina.
 - a) El cuestionario consistirá en la aplicación de preguntas prácticas y de historia clínica para la evaluación del paciente dividiéndose en dos partes:
 - i) La primera parte consistirá en conocer el historial del paciente con respecto al trastorno temporomandibular basadas en respuestas de sí, no y tiempo.
 - ii) En la segunda parte, se realizarán una serie de pruebas técnicas de medición al paciente en zonas de la mandíbula. Esta prueba puede incluir la exploración física de diversas zonas de la cara y cavidad oral del paciente.
 - b) La prueba con el sistema de visión máquina consiste en la colocación de marcadores, impresos en etiquetas. La colocación de dichos marcadores será entre las cejas, justo debajo del nacimiento de la nariz y en la parte baja del mentón sobre la línea media de la cara (punto craneométrico medio de referencia Nasal o Nasion, punto craneométrico medio de referencia Nasoespinal y punto craneométrico medio de referencia Gnación, respectivamente). Una vez colocados, se le pedirá al paciente realizar movimientos similares a los realizados durante el cuestionario. Estos movimientos serán grabados en su totalidad por una cámara en la computadora sin mayor necesidad de exploración física.
- II) Los resultados de este estudio ayudaran a determinar el mejor diagnóstico de la enfermedad en mi caso y el de otros pacientes.

Beneficios para el paciente: Se llevará a cabo un diagnóstico oportuno y gratuito, lo canalizamos con el personal especialista para que continúe con un tratamiento en caso de padecer alguna alteración de este tipo, y con ello se verá un aumento en la calidad de vida ya que de esta alteración derivan múltiples.

Beneficios para la sociedad: Los resultados ayudaran a realizar un método moderno con el uso de la tecnología por medio de un sistema de visión computacional de manejo intuitivo. El diseño compacto del dispositivo permite al médico trasladar el sistema hasta el lugar donde se encuentra el paciente, reflejando resultados en un crecimiento demográfico. Además, de ser un sistema que permita diagnosticar de forma oportuna y sin necesidad someter al paciente a métodos de prueba que le generen incomodidad

Potenciales riesgos: Se me explico que la realización de los movimientos puede llegar a causar molestia y dolor dependiendo del grado de lesión en la articulación temporomandibular, estos se resolverán con las indicaciones médicas en términos de una semana. Además de que no existir riesgo para la salud, ya que no se implementarán sustancias ajenas al cuerpo.

Aviso de Privacidad Simplificado: Los investigadores de este estudio, son responsables del tratamiento y resguardo de los datos personales que nos proporcione, los cuales serán protegidos conforme a lo dispuesto por la **Ley General de Protección de Datos Personales en Posesión de Sujetos Obligado**. Para más información puede acceder al siguiente sitio web https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/documentos/2019-04/Ley_GDPDPSO.pdf . Las videograbaciones e información que se nos proporcione serán protegidos y al cuidado de los investigadores responsables del estudio, así mismo se informa que no se realizará transferencia de datos personales salvo aquellas que sean necesarias para atender requerimientos de información de una autoridad competente.

Participación o retiro: Se me ha asegurado que puedo preguntar hasta mi complacencia todo lo relacionado con el estudio y mi participación. De la misma manera se me aclaró que puedo abandonar el estudio en cuanto yo lo decida, sin que ello afecte mi atención médica. Así mismo, autorizó la publicación de los resultados de mi estudio a condición de que en todo momento se mantendrá el secreto profesional y que no se publicará mi nombre o revelará mi identidad.

Consideraciones éticas: El protocolo de investigación titulado **Análisis Biomédico de la Disfunción Craneomandibular** cumple con las disposiciones contenidas en la Ley General de Salud, Título Quinto “Investigación para la Salud”, Capítulo Único, artículo 100, fracción IV; así como del Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud, Título Segundo “De los Aspectos Éticos de la Investigación en Seres Humanos” Capítulo I, Disposiciones Comunes, artículo 13 que señala que en toda investigación en la que el ser humano sea sujeto de estudio, deberán prevalecer el criterio del respeto a su dignidad y la protección de sus derechos y bienestar, artículos 14 fracción V, 20, 21 y 22 de dicho Reglamento; y, de conformidad con los principios éticos contenidos en la Declaración de Helsinki.

Compromiso de respuesta: Si usted tiene alguna pregunta, comentario o preocupación con respecto al proyecto, por favor comuníquese con el/la investigador/a responsable del proyecto en su Institución.

Números de Contacto: Puede contactar al Dr. Omar Gutiérrez Navarro al siguiente número de teléfono (449) 910-74-00 Ext. 9510 en un horario de 8:00 am a 3:30 pm o al correo electrónico omar.gutierrez@edu.uaa.mx o al IB. Mónica Castillo Juárez al correo al177370@edu.uaa.mx en un horario de 8:00 am a 3:30 pm.

Dirección: El estudio se realizará en la Unidad Médico Didáctica en el Departamento de Estomatología 101, Universidad Autónoma de Aguascalientes, 20130 Aguascalientes

Con fecha _____, habiendo comprendido lo anterior y una vez que se me aclararon todas las dudas que surgieron con respecto a mi participación en el proyecto, yo _____ con número de expediente _____ acepto participar en el estudio.

Nombre y firma del paciente o responsable legal: _____.

Nombre, y firma del testigo 1: _____.

Dirección: _____.

Relación que guarda con el paciente: _____.

Nombre, y firma del testigo 2: _____.

Dirección: _____.

Relación que guarda con el paciente: _____.

Nombre y firma del Investigador Principal: _____.

Nombre y firma de quien aplica el consentimiento informado: _____.

Este documento se extiende por triplicado, quedando un ejemplar en poder del sujeto de investigación o de su representante legal y otro en poder del investigador. Es obligatorio integrar al expediente clínico una copia de este, anexando una nota donde se especifique que el sujeto de estudio está participando en el protocolo (señalando título y número de registro y nombre del investigador responsable). Queda entendido que la Dirección de Investigación, o los Comités podrán requerir este documento en cuanto lo consideren necesario. Este documento deberá ser conservado por el investigador responsable durante un mínimo de 5 años.



B. DC/TMD

CD/TTM Formulario de Examen				Fecha del examen (día-mes-año)																			
Paciente _____		Examinador _____		<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20px; height: 20px;"></td> <td style="width: 20px; height: 20px;"></td> <td style="width: 20px; height: 20px;"></td> <td style="width: 20px; height: 20px;"></td> <td style="width: 20px; height: 20px;"></td> <td style="width: 20px; height: 20px;"></td> <td style="width: 20px; height: 20px;"></td> <td style="width: 20px; height: 20px;"></td> </tr> </table>																			
1a. Localización del dolor: En los últimos 30 días (Seleccionar todas las que apliquen)																							
LADO DERECHO				LADO IZQUIERDO																			
<input type="radio"/> Ninguno <input type="radio"/> Temporal <input type="radio"/> Otros musc masticatorios <input type="radio"/> Masetero <input type="radio"/> ATM <input type="radio"/> Estructura No-masticatoria.				<input type="radio"/> Ninguno <input type="radio"/> Temporal <input type="radio"/> Otros musc masticatorios <input type="radio"/> Masetero <input type="radio"/> ATM <input type="radio"/> Estructura No-masticatoria																			
1b. Localización de la cefalea: En los últimos 30 días (Seleccione todas las que apliquen)																							
<input type="radio"/> Ninguno <input type="radio"/> Temporal <input type="radio"/> Otro				<input type="radio"/> Ninguno <input type="radio"/> Temporal <input type="radio"/> Otro																			
2. Relaciones Incisales Diente de Referencia <input type="radio"/> FDI #11 <input type="radio"/> FDI #21 <input type="radio"/> Otro																							
Sobre-mordida Horizontal		<input type="radio"/> Negativo <table border="1" style="width: 40px; height: 20px; display: inline-table;"></table> mm		Sobre-mordida Vertical		<input type="radio"/> Negativo <table border="1" style="width: 40px; height: 20px; display: inline-table;"></table> mm																	
				Der Izq N/A <table border="1" style="width: 40px; height: 20px; display: inline-table;"></table> mm																			
3. Patrón de Apertura (Complementario; Seleccione uno)																							
<input type="radio"/> Recto <input type="radio"/> Desviación corregida				<input type="radio"/> Derecha <input type="radio"/> Izquierda																			
<i>Desviación no corregida</i>																							
4. Movimientos de Apertura y Cierre																							
A. Apertura Sin Dolor																							
<table border="1" style="width: 40px; height: 20px; display: inline-table;"></table> mm		LADO DERECHO			LADO IZQUIERDO																		
		Dolor Dolor Familiar Cefalea Familiar			Dolor Dolor Familiar Cefalea Familiar																		
		Temporal Masetero ATM Otros Musc M No Masticat.			Temporal Masetero ATM Otros Musc M No Masticat.																		
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td></tr> </table>			N	S	N	S	N	S	N	S	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td></tr> </table>			N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S																
N	S	N	S	N	S	N	S																
B. Apertura Maxima No Asistida																							
<table border="1" style="width: 40px; height: 20px; display: inline-table;"></table> mm		LADO DERECHO			LADO IZQUIERDO																		
		Dolor Dolor Familiar Cefalea Familiar			Dolor Dolor Familiar Cefalea Familiar																		
		Temporal Masetero ATM Otros Musc M No Masticat.			Temporal Masetero ATM Otros Musc M No Masticat.																		
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td></tr> </table>			N	S	N	S	N	S	N	S	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td></tr> </table>			N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S																
N	S	N	S	N	S	N	S																
C. Apertura Maxima Asistida																							
<table border="1" style="width: 40px; height: 20px; display: inline-table;"></table> mm		LADO DERECHO			LADO IZQUIERDO																		
		Dolor Dolor Familiar Cefalea Familiar			Dolor Dolor Familiar Cefalea Familiar																		
		Temporal Masetero ATM Otros Musc M No Masticat.			Temporal Masetero ATM Otros Musc M No Masticat.																		
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td></tr> </table>			N	S	N	S	N	S	N	S	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td></tr> </table>			N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S																
N	S	N	S	N	S	N	S																
D. ¿Terminada? <input type="radio"/> N <input type="radio"/> S																							
5. Movimientos Laterales y Protrusión																							
A. Lateralidad Derecha																							
<table border="1" style="width: 40px; height: 20px; display: inline-table;"></table> mm		LADO DERECHO			LADO IZQUIERDO																		
		Dolor Dolor Familiar Cefalea Familiar			Dolor Dolor Familiar Cefalea Familiar																		
		Temporal Masetero ATM Otros Musc M No Masticat.			Temporal Masetero ATM Otros Musc M No Masticat.																		
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td></tr> </table>			N	S	N	S	N	S	N	S	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td></tr> </table>			N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S																
N	S	N	S	N	S	N	S																
B. Lateralidad Izquierda																							
<table border="1" style="width: 40px; height: 20px; display: inline-table;"></table> mm		LADO DERECHO			LADO IZQUIERDO																		
		Dolor Dolor Familiar Cefalea Familiar			Dolor Dolor Familiar Cefalea Familiar																		
		Temporal Masetero ATM Otros Musc M No Masticat.			Temporal Masetero ATM Otros Musc M No Masticat.																		
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td></tr> </table>			N	S	N	S	N	S	N	S	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td></tr> </table>			N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S																
N	S	N	S	N	S	N	S																
C. Protrusión																							
<table border="1" style="width: 40px; height: 20px; display: inline-table;"></table> mm		LADO DERECHO			LADO IZQUIERDO																		
		Dolor Dolor Familiar Cefalea Familiar			Dolor Dolor Familiar Cefalea Familiar																		
		Temporal Masetero ATM Otros Musc M No Masticat.			Temporal Masetero ATM Otros Musc M No Masticat.																		
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td></tr> </table>			N	S	N	S	N	S	N	S	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td><td style="width: 15%;">N</td><td style="width: 15%;">S</td></tr> </table>			N	S	N	S	N	S	N	S
N	S	N	S	N	S	N	S																
N	S	N	S	N	S	N	S																
<input type="radio"/> Si es negativa																							

6. Ruidos Articulares durante Movimientos de Apertura y Cierre														
ATM DERECHA					ATM IZQUIERDA									
	Examinador		Paciente		Dolor c/ Clic	Dolor Familiar		Examinador		Paciente		Dolor c/ Clic	Dolor Familiar	
Clic	Apertura	Cierre	Apertura	Cierre				Apertura	Cierre	Apertura	Cierre			
	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
Crepitación	Apertura	Cierre	Apertura	Cierre				Apertura	Cierre	Apertura	Cierre			
	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
7. Ruidos de la ATM durante los Movimientos Laterales y Protrusión														
ATM DERECHA					ATM IZQUIERDA									
	Examinador		Paciente		Dolor c/ Clic	Dolor Familiar		Examinador		Paciente		Dolor c/ Clic	Dolor Familiar	
Clic	Apertura	Cierre	Apertura	Cierre				Apertura	Cierre	Apertura	Cierre			
	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
Crepitación	Apertura	Cierre	Apertura	Cierre				Apertura	Cierre	Apertura	Cierre			
	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
8. Bloqueo Articular														
ATM DERECHA					ATM IZQUIERDA									
	Bloqueo		Reducción					Bloqueo		Reducción				
	Paciente		Evaluador					Paciente		Evaluador				
Mientras Abre	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
Posición Max. Apertura	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
9. Dolor Muscular y de ATM con la Palpación														
LADO DERECHO					LADO IZQUIERDO									
(1 kg)	Dolor	Dolor Familiar	Cefalea Familiar	Dolor Referido	(1 kg)	Dolor	Dolor Familiar	Cefalea Familiar	Dolor Referido					
Temporal (posterior)	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S				
Temporal (medio)	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S				
Temporal (anterior)	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S				
Masetero (origen)	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S				
Masetero (cuerpo)	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S				
Masetero (inserción)	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S				
Polo Lateral (0.5 kg)	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S				
Alrededor P.L(1 kg)	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S				
10. Músculos Adicionales														
LADO DERECHO					LADO IZQUIERDO									
(0.5 kg)	Dolor	Dolor Familiar	Dolor Referido		(0.5 kg)	Dolor	Dolor Familiar	Dolor Referido						
Región Mandibular Posterior	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S				
Región Submandibular	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S				
Area Pterigoideo Lateral	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S				
Tendón del Temporal	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S				
11. Diagnósticos														
Trastornos Dolorosos			ATM Derecha			ATM Izquierda								
<input type="radio"/> Ninguno <input type="radio"/> Mialgia <input type="radio"/> Dolor Miofascial con patron referido <input type="radio"/> Artralgia ATM derecha <input type="radio"/> Artralgia ATM izquierda <input type="radio"/> Cefalea atribuida a TTM			<input type="radio"/> Ninguno Desplazamiento del Disco (marque uno) <input type="radio"/> con reducción <input type="radio"/> con reducción, con bloqueo intermitente <input type="radio"/> sin reducción, con limitación de apertura <input type="radio"/> sin reducción, sin limitación de apertura <input type="radio"/> Enfermedad degenerativa <input type="radio"/> Subluxación			<input type="radio"/> Ninguno Desplazamiento del Disco (marque uno) <input type="radio"/> con reducción <input type="radio"/> con reducción, con bloqueo intermitente <input type="radio"/> sin reducción, con limitación de apertura <input type="radio"/> sin reducción, sin limitación de apertura <input type="radio"/> Enfermedad degenerativa <input type="radio"/> Subluxación								
12. Comentarios del Examinador														
Copyright INFORM. Versión en Español: González Y, Castrillón E, Oyarzo JF, Espinoza de Santillana I, Ortiz F, Velasco Neri J, Leyva E. Version 12May2013. Available at http://www.rdc-tmdinternational.org . No permission required to reproduce, translate, display, or distribute														

C. DIAGRAMA DE CAJA DE CARACTERÍSTICAS CON MAYOR DIFERENCIA

Las figuras Figura 42, Figura 43, Figura 44, Figura 45, Figura 46, Figura 47, Figura 48 y Figura 49, mostramos los diagramas de caja de las características obtenidas.

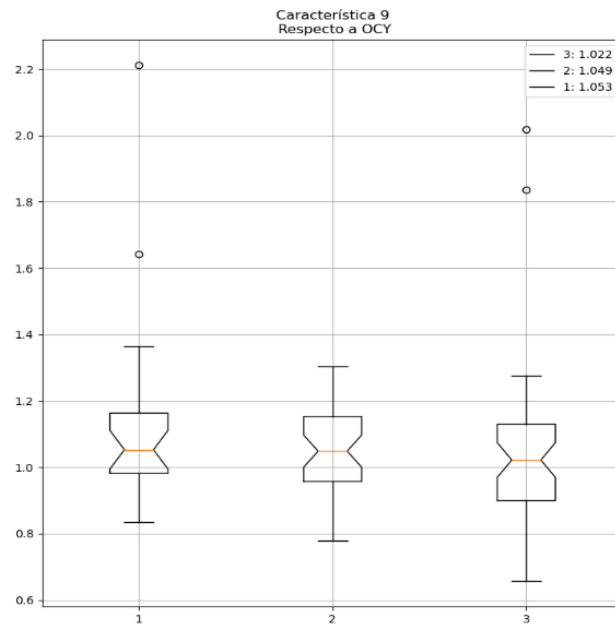


Figura 42 Observamos la razón de cambio del área con respecto al eje Y durante el movimiento de apertura y cierre. Se observa un cambio de la media entre el grupo de Sano y Mialgia vs Artralgia. En color naranja observamos la mediana de las clasificaciones, las cuales están definidas como 1= Sano, 2=Mialgia y 3= Artralgia.

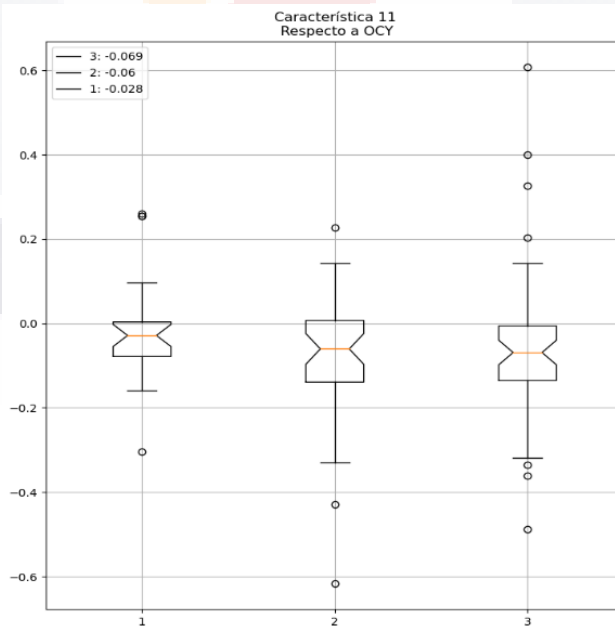


Figura 43 Observamos la media de la velocidad con respecto al eje Y durante el movimiento de apertura y cierre. Se observa un cambio de la media entre el grupo de Sano vs Mialgia y Artralgia. En color naranja observamos la mediana de las clasificaciones, las cuales están definidas como 1= Sano, 2=Mialgia y 3= Artralgia.

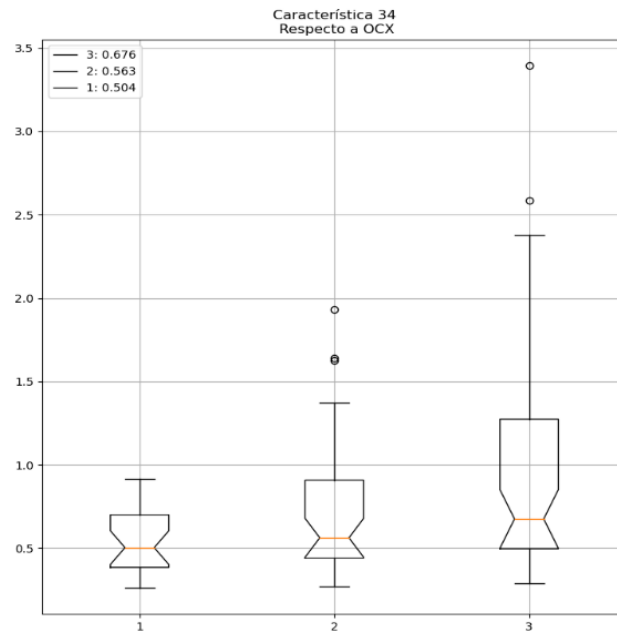


Figura 44 Observamos la media de la desviación con respecto al eje X durante el movimiento de apertura y cierre. Se observa un cambio de la media entre los grupos de Sano, Mialgia vs Artralgia. En color naranja observamos la mediana de las clasificaciones, las cuales están definidas como 1= Sano, 2=Mialgia y 3= Artralgia.

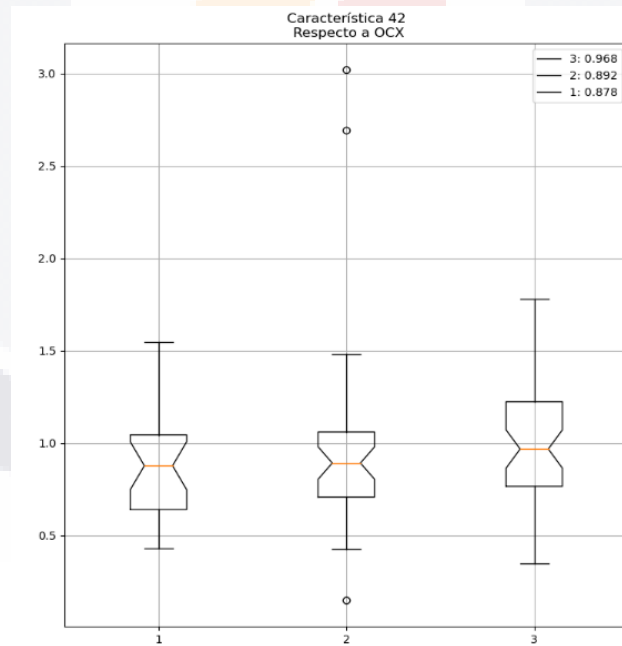


Figura 45 Observamos la razón de cambio de la desviación con respecto al eje X durante el movimiento de apertura y cierre. Se observa un cambio de la media entre el grupo de Sano y Mialgia vs Artralgia. En color naranja observamos la mediana de las clasificaciones, las cuales están definidas como 1= Sano, 2=Mialgia y 3= Artralgia.

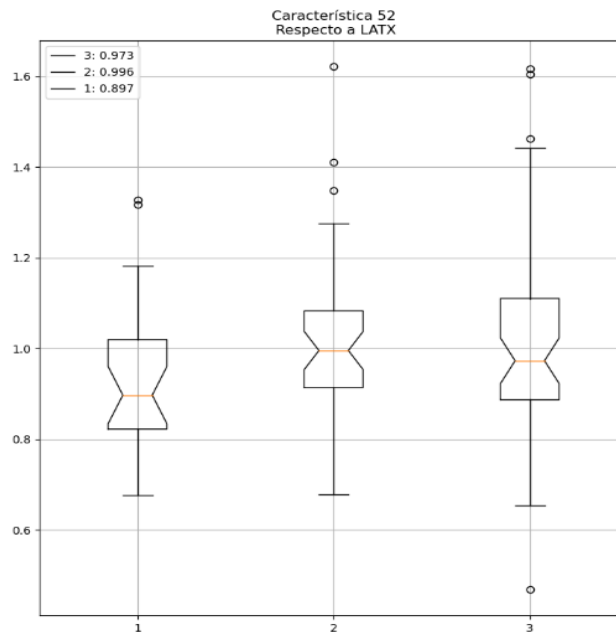


Figura 46 Observamos la razón de cambio del área con respecto al eje X durante el movimiento de lateralidades. Se observa un cambio de la media entre el grupo de Sano vs Mialgia y Artralgia. En color naranja observamos la mediana de las clasificaciones, las cuales estan definidas como 1= Sano, 2=Mialgia y 3= Artralgia.

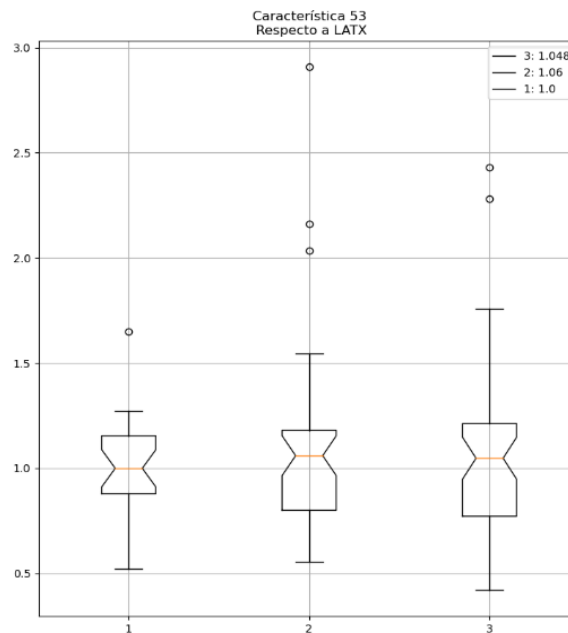


Figura 47 Observamos la razón de cambio del área con respecto al eje Y durante el movimiento de lateralidades. Se observa un cambio de la media entre el grupo de Sano vs Mialgia y Artralgia. En color naranja observamos la mediana de las clasificaciones, las cuales estan definidas como 1= Sano, 2=Mialgia y 3= Artralgia.

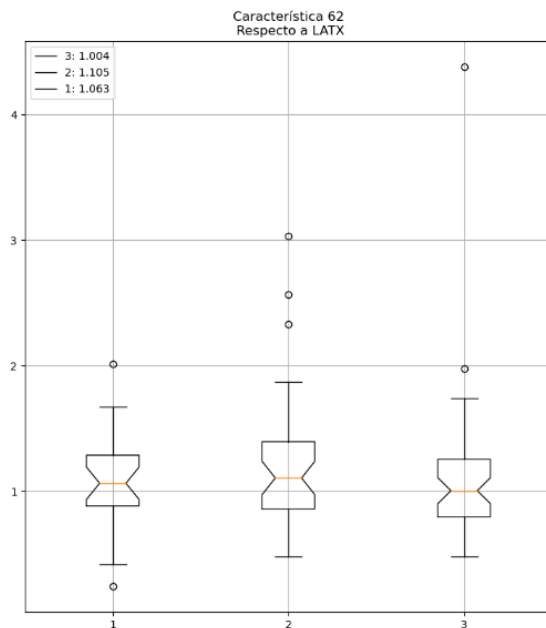


Figura 48 Observamos la razón de cambio de la velocidad con respecto al eje X durante el movimiento de lateralidades. Se observa un cambio de la media entre los grupos de Sano, Mialgia y Artralgia. En color naranja observamos la mediana de las clasificaciones, las cuales están definidas como 1= Sano, 2=Mialgia y 3= Artralgia.

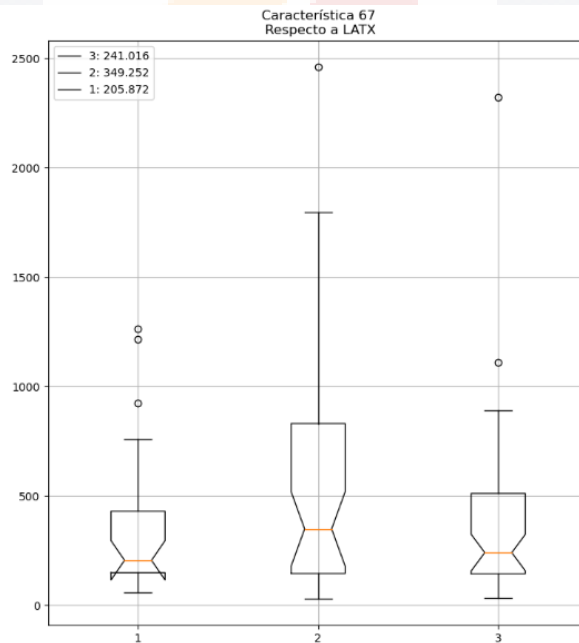


Figura 49 Observamos la media de aceleración con respecto al eje Y durante el movimiento de lateralidades. Se observa un cambio de la media entre el grupo de Sano vs Artralgia y Mialgia. En color naranja observamos la mediana de las clasificaciones, las cuales están definidas como 1= Sano, 2=Mialgia y 3= Artralgia.

D. CALIBRACIÓN DEL SVC

Código de Python para la calibración.

```

import numpy as np
import cv2
import glob
from numpy import *

# criterios de terminación
criteria = (cv2.TERM_CRITERIA_EPS + cv2.TERM_CRITERIA_MAX_ITER, 30, 0.001)

# preparar los puntos de los objetos, como (0,0,0), (1,0,0), (2,0,0) ....., (6,5,0)
objp = np.zeros((6*7,3), np.float32)
# creamos una malla con la distancia de las medidas reales del tablero de ajedrez en metros
objp[:,2] = np.mgrid[0:18:7j,0:15:6j].T.reshape(-1,2)

# Matrices para almacenar los puntos del objeto y los puntos de la imagen de todas las imágenes.
objpoints = [] # 3d punto en el espacio del mundo real
imgpoints = [] # 2d puntos en el plano de la imagen.

# Cargamos todas las imágenes para calibrar
images = glob.glob('*.*jpg')
acum=0

for fname in images:
    # Se lee una imagen por separado
    img = cv2.imread(fname)
    # Se muestra la imagen
    cv2.imshow('im',img)
    # Convertimos la imagen a blanco y negro
    gra = cv2.cvtColor(img,cv2.COLOR_BGR2GRAY)

    # Encuentra las esquinas del tablero de ajedrez
    ret, corners = cv2.findChessboardCorners(gra, (7,6),None)

    # Si se encuentran, añadir puntos de objeto, puntos de imagen (después de refinarlos)
    if ret == True:
        acum+=1
        objpoints.append(objp)

        corners2 = cv2.cornerSubPix(gra,corners,(11,11),(-1,-1),criteria)
        imgpoints.append(corners2)

    # Dibujar y muestra las esquinas
    img = cv2.drawChessboardCorners(img, (7,6), corners2,ret)
    cv2.imshow('img',img)
    cv2.waitKey(50)
cv2.destroyAllWindows()

```

```
# Obtenemos los coeficientes de calibración
ret, mtx, dist, rvecs, tvecs = cv2.calibrateCamera(objpoints, imgpoints, gra.shape[:-1],None,None)
# Guardamos la matriz y los coeficientes de distorsión
savez('Calibracion dia 2.npz', mtx=mtx, dist=dist)
```

E. CORRELACIÓN DE PEARSON

Codigo de la correlación de Pearson's

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Leemos la base de datos con terminación csv
df=pd.read_csv('Registro Paciente/Datos pacientes.csv',
              header=None, na_values = '*', sep =',')
n=len(df.axes[1])-1
#Separamos los datos de las características de las etiquetas
y = df[n].values
Xor=df.iloc[:,0:n]

#Seleccionamos las características para realizar la correlación
todo=[0,1,9,11,18,23,34,35,42,44,52,53,54,62,63,67,74,75,78,79,88,89]
# Creamos un Data Frame con las características
X = pd.DataFrame(Xor,columns=todo)

#MATRIZ DE CORRELACIÓN
C = X.corr('pearson').abs()

# Graficamos la matriz
plt.figure()
sns.heatmap(C)
plt.show()
```

F. ELIMINACIÓN RECURSIVA DE CARACTERÍSTICAS (RFE)

Codigo para RFE.

```
##### LIBRERÍAS A UTILIZAR #####
#Se importan la librerias a utilizar
import numpy as np
import matplotlib
from matplotlib import pyplot as plt
import pandas as pd

##### PREPARAR LOS DATOS #####
```



```

#Importamos los datos de la misma librería de scikit-learn

df = pd.read_csv('Registro Paciente/Datos pacientes.csv',
                header=None
                ,sep=',')
print(df.head())
# Separamos etiquetas de las características
# Etiquetas: A = Artralgia, S = Sano, M=Mialgia,
n=len(df.axes[1])-1
y = df[n].values # Etiquetas

## Número de observaciones
m = len(y)
yl = np.reshape(y,(m,1))

# Construimos nuestra matriz de observaciones
X=pd.DataFrame()
for n in range (0,len(df.axes[1])-1):
    x1=pd.Series(df[n].values)
    X[n]=x1

#Estandarizar
Xst = pd.DataFrame(StandardScaler().fit_transform(X))
yl=pd.DataFrame(yl)
carac=[9,11,18,23,34,35,42,52,53,54,62,63,67,78,79,88,89]

#Trabajamos con las características restantes del ACP
Xt = pd.DataFrame(X,columns=carac)

# Lo convertimos en array
Xt=np.array(Xt)
y = yl.iloc[:,0].values

# Creamos un nuevo vector con la codificación
# 0 = Sano
# 1 = Mialgia
# 2 = Artralgia
etiAM=np.zeros(len(y),dtype=int)
etiAM[y=='M']=1
etiAM[y=='A']=2
# Creamos matriz de las características de cada grupo
datoA=Xt[etiAM==2]
datoM=Xt[etiAM==1]
datoS=Xt[etiAM==0]
# Creamos vectores con la codificación de cada grupo
etiS=etiAM[etiAM==0]
etiM=etiAM[etiAM==1]
etiA=etiAM[etiAM==2]

# Este apartado creamos una matriz y un vector de acuerdo con las subclasificaciones necesarias

```

```
X_con=np.concatenate([datoS,datoA])#,datoA)
y_con=np.concatenate([etiS,etiA])#,etiA)

# Librerías para la utilización del RFE
from sklearn.linear_model import LogisticRegression
from sklearn.feature_selection import RFE

X_train=X_con
y_train=y_con

# Selector de características
feature_selectorD = RFE(LogisticRegression(),
    n_features_to_select=4,
    )
# Se acoplan las características al selector
feature_selectD = feature_selectorD.fit(X_train, y_train)
print(feature_selectD.score(X_train, y_train))
#
variables=['C9','C11','C18','C23','C34','C35','C42','C52','C53','C54','C62','C63','C67','C78','C79','C88','C89']
# Visualización de la selección y ponderación de las características por medio de RFE
plt.figure()
plt.bar(variables,feature_selectD.ranking_)
plt.ylabel('Rango o Ranking')
plt.xlabel('Característica')
plt.title('Posición/Clasificación de las características')
```

G. ANOVA CON SUMA DE CUADRADOS TIPO II

Código de implementación de ANOVA

```
##### LIBRERÍAS A UTILIZAR #####
#Se importan la librerías a utilizar
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
import pandas as pd

##### PREPARAR LOS DATOS #####
#Importamos los datos de la misma librería de scikit-learn

df = pd.read_csv('Registro Paciente/Datos pacientes.csv',
    header=None
    ,sep=',')
print(df.head())
# Separamos etiquetas de las características
# Etiquetas: A = Artralgia, S = Sano, M=Mialgia,
n=len(df.axes[1])-1
y = df[n].values # Etiquetas
```

```

## Número de observaciones
m = len(y)
yl = np.reshape(y,(m,1))

# Construimos nuestra matriz de observaciones
X=pd.DataFrame()
for n in range (0,len(df.axes[1])-1):
    x1=pd.Series(df[n].values)
    X[n]=x1

#Estandarizar
Xst = pd.DataFrame(StandardScaler().fit_transform(X))
yl=pd.DataFrame(yl)
carac=[9,11,18,23,34,35,42,52,53,54,62,63,67,78,79,88,89]

#Trabajamos con las características restantes del ACP
Xt = pd.DataFrame(X,columns=carac)

# Lo convertimos en array
Xt=np.array(Xt)
y = yl.iloc[:,0].values

# creamos un nuevo vector con la codificación
# 0 = Sano
# 1 = Mialgia
# 2 = Artralgia
etiAM=np.zeros(len(y),dtype=int)
etiAM[y=='M']=1
etiAM[y=='A']=2
# Creamos matriz de las características de cada grupo
datoA=Xt[etiAM==2]
datoM=Xt[etiAM==1]
datoS=Xt[etiAM==0]
# Creamos vectores con la codificación de cada grupo
etiS=etiAM[etiAM==0]
etiM=etiAM[etiAM==1]
etiA=etiAM[etiAM==2]

# Este apartado creamos una matriz y un vector de acuerdo con las subclasificaciones necesarias
X_con=np.concatenate([datoS,datoA])#,datoA])
y_con=np.concatenate([etiS,etiA])#,etiA])

# Librerías para la utilización del ANOVA
import statsmodels.formula.api as smf
import statsmodels.api as sm

X_train=X_con

```

```

y_train=y_con

# Creamos una nueva base de datos
data=pd.concat([pd.DataFrame(y_train),pd.DataFrame(X_train)],axis=1)
data.columns=['y_train','C9','C11','C18','C23','C34','C35','C42','C52','C53','C54','C62','C63','C67','C78','C79','C88','C89']

# En la formula se modifica de acuerdo con las características salientes del RFE para cada subclasificación
f='y_train ~C11+C34+C88+C89' # Subclasificacion de Sanos vs Enfermos

#Creamos un modelo de regresión logística
m1=smf.ols(f,data=data).fit()
# Aplicamos ANOVA con suma de cuadrados tipo II
re=sm.stats.anova_lm(m1,typ=2)
# Podemos observar los resultados
print(re)

```

H. RENDIMIENTO SVM.

Código de aplicación y rendimiento de SVM

```

##### LIBRERÍAS A UTILIZAR #####
#Se importan la librerías a utilizar
from matplotlib import pyplot as plt
import pandas as pd

##### PREPARAR LA DATA #####
#Importamos los datos de la misma librería de scikit-learn
df = pd.read_csv('Registro Paciente/Datos pacientes.csv',
                header=None,
                ,sep=',')
# Construimos nuestra matriz de observaciones y el vector de etiquetas
n=len(df.axes[1])-1
y = df[n].values # Etiquetas
m = len(y)
yl = np.reshape(y,(m,1))

# Matriz de observaciones
X=np.zeros((len(df.axes[0]),n))
for n in range (0,len(df.axes[1])-1):
    x1=df[n].values
    X[:,n]=x1[:]

# Convertimos a Data frame la matriz y el vector
X=pd.DataFrame(X)
yl=pd.DataFrame(yl)
# Características seleccionadas al final de ANOVA
todo=[34,52,67,88,89]
Xt = pd.DataFrame(X,columns=todo)

```

```

y = yl.iloc[:,0].values

# Creamos un nuevo vector con la codificación
# 0 = Sano
# 1 = Mialgia
# 2 = Artralgia

# Para realizar las distintas clasificaciones lo podemos modificar el numero de asignación
etiAM=np.zeros(len(y),dtype=int)
etiAM[y=='M']=1
etiAM[y=='A']=2

# Para subdividir el diagnóstico de CG+AG vs MG → EJEMPLO
# etiAM[y=='M']=1
# etiAM[y=='A']=0

# Label Encoder lo utilizamos cuando tenemos que hacer el rendimiento de 3 vías
from sklearn.preprocessing import LabelEncoder
from keras.utils import np_utils
Y = etiAM
encoder = LabelEncoder()
encoder.fit(Y)
encoded_Y = encoder.transform(Y)
# codificación en caliente ( hot encoded)
dummy_y = np_utils.to_categorical(encoded_Y)

# CREAMOS EL SVM CON DIFERENTE KERNEL
from sklearn import svm
import sklearn.model_selection as model_selection
from sklearn.metrics import accuracy_score, f1_score,precision_score, recall_score
from sklearn.multiclass import OneVsRestClassifier

random_state = np.random.RandomState(0)

# Kernel RBF
rbf=OneVsRestClassifier(svm.SVC(kernel='rbf', gamma='auto',probability=True,
                                random_state=random_state))
# Kernel POLINOMIAL
poly=OneVsRestClassifier(svm.SVC(kernel='poly',probability=True,
                                random_state=random_state))
#Kernel LINEAL
modelo = OneVsRestClassifier(svm.SVC(kernel='linear', probability=True,
                                random_state=random_state))

#### IMPORTAR LAS LIBRERÍAS PARA RENDIMIENTO ####
import scipy
from sklearn.model_selection import StratifiedKFold
from sklearn.model_selection import cross_val_score

```

```

from sklearn.metrics import roc_curve, confusion_matrix, multilabel_confusion_matrix

, auc,roc_auc_score
from sklearn.metrics import RocCurveDisplay

# RENDIMIENTO DE 3 GRUPOS
cv = StratifiedKFold(n_splits=20)
tprs, aucs, sen, spe, MSE = [], [], [], [], []
mean_fpr = np.linspace(0, 1, 1000)
fpr = dict()
tpr = dict()
roc_auc = dict()
n_classes=3
X_std=np.array(Xt)
etiAM=np.array(etiAM)
# CAMBIAMOS EL NOMBRE DEL KERNEL A UTILIZAR
modelo1=modelo # Podemos cambiar el nombre a rbf o Poly
for train, test in cv.split(X_std, etiAM):
    prediction =modelo1.fit(X_std[train],dummy_y[train]).predict_proba(X_std[test])
    y_pred=modelo1.fit(X_std[train],
        dummy_y[train]).predict(X_std[test])
    cv_score=cross_val_score(modelo1, X_std[train],dummy_y[train])
    y_test=dummy_y[test]
    for i in range(n_classes):
        fpr[i], tpr[i], _ = roc_curve(y_test[:,i], prediction[:, i])
        roc_auc[i] = auc(fpr[i], tpr[i])

    for i in range(n_classes):
        inter_tpr=np.interp(mean_fpr, fpr[i], tpr[i])
        inter_tpr[0]=0.0
        tprs.append(inter_tpr)
        aucs.append(roc_auc[i])

y_true=dummy_y[test]

# Se realiza la separación de los resultados, siendo:
# tn=true negative (verdaderos negativos)
# tp=true positive (verdaderos positivos)
# fn=false negative (falsos negativos) → Error tipo II
# fp=false positive (falsos positivos) → Error tipo I
mcm = multilabel_confusion_matrix(y_true, y_pred)
tn = mcm[:, 0, 0]
tp = mcm[:, 1, 1]
fn = mcm[:, 1, 0]
fp = mcm[:, 0, 1]

# Error de clase
MSE.append((fp+fn)/len(test))
# Sensibilidad
sen.append(tp / (tp + fn))

```

```

#Especificidad
spe.append(tn / (tn + fp))

# GRÁFICA CURVA ROC 3 GRUPOS
mean_tpr = np.mean(tprs, axis=0)
mean_auc = auc(mean_fpr, mean_tpr)
std_auc = np.var(aucs)
plt.figure()
lw = 2
plt.plot(
    mean_fpr,
    mean_tpr,
    color="darkorange",
    lw=lw,
    label=r'Media ROC (AUC = %0.2f  $\pm$  %0.2f)' % (mean_auc, std_auc))
plt.plot([0, 1], [0, 1], color="navy", lw=lw, linestyle="--")
plt.xlabel('Falsos positivos')
plt.ylabel('Verdaderos positivos')
plt.title('Curva ROC')
plt.legend(loc="lower right")
plt.show()

# RENDIMIENTO DE 2 GRUPOS

cv = StratifiedKFold(n_splits=20)
tprs, aucs, sen, spe, MSE = [], [], [], [], []
mean_fpr = np.linspace(0, 1, 1000)
fpr = dict()
tpr = dict()
roc_auc = dict()
X_std = np.array(Xt)
etiAM = np.array(etiAM)
# CAMBIAMOS EL NOMBRE DEL KERNEL A UTILIZAR
modelo1 = modelo # Podemos cambiar el nombre a rbf o Poly
for train, test in cv.split(X_std, etiAM):
    prediction = modelo1.fit(X_std[train],
                             etiAM[train]).predict_proba(X_std[test])
    y_pred = modelo1.fit(X_std[train],
                         etiAM[train]).predict(X_std[test])
    cv_score = cross_val_score(modelo1, X_std[train], etiAM[train])
    y_test = etiAM[test]
    fpr, tpr, t = roc_curve(y_test, prediction[:,1])
    inter_tpr = np.interp(mean_fpr, fpr, tpr)
    inter_tpr[0] = 0.0
    tprs.append(inter_tpr)

roc_auc = auc(fpr, tpr)
aucs.append(roc_auc)
y_true = etiAM[test]

```

```
# Se realiza la separación de los resultados, siendo:
# tn=true negative (verdaderos negativos)
# tp=true positive (verdaderos positivos)
# fn=false negative (falsos negativos) → Error tipo II
# fp=false positive (falsos positivos) → Error tipo I
cm= confusion_matrix(y_true, y_pred)
tn = cm[0, 0]
tp = cm[1, 1]
fn = cm[1, 0]
fp = cm[0, 1]
```

```
# Error de clase
MSE.append((fp+fn)/len(test))
# Sensibilidad
sen.append(tp / (tp + fn))
#Especificidad
spe.append(tn / (tn + fp))
```

GRÁFICA CURVA ROC 2 GRUPOS

```
plt.plot([0,1], [0,1], linestyle='--', lw=2, color='black')
mean_tpr = np.mean(tprs, axis=0)
mean_auc = auc(mean_fpr, mean_tpr)
std_auc = np.var(aucs)
plt.plot(mean_fpr, mean_tpr, color='blue', label=r'Media ROC (AUC = %0.2f $\pm$ %0.2f)' %
(mean_auc, std_auc), lw=2, alpha=1)
plt.xlabel('Falsos positivos')
plt.ylabel('Verdaderos positivos')
plt.title('Curva ROC')
plt.legend(loc="lower right")
plt.show()
```

```
# IMPRIMIMOS LA MEDIA DEL RENDIMIENTO Y LA VARIANZA
print('Sensibilidad: ',np.mean(sen),u"\u00B1",f'{np.var(sen)}\n Especificidad:
',np.mean(spe),u"\u00B1",f'{np.var(spe)}')
print('Error de clase: ',np.mean(MSE),u"\u00B1",f'{np.var(MSE)}')
```