

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INFORMÁTICA
GRADO EN INGENIERÍA DE COMPUTADORES

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE AYUDA A LA DECISIÓN
PARA TRATAMIENTOS ODONTOLÓGICOS CON IMÁGENES
DIGITALES**

**DEVELOPMENT OF A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR
DENTAL TREATMENTS WITH DIGITAL IMAGES**

Realizado por
Daniel Ridaó Marín
Tutorizado por
José Ignacio Peláez Sánchez
Departamento
Lenguajes y Ciencias de la Computación

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
MÁLAGA, FEBRERO 2015

Fecha defensa:
El Secretario del Tribunal

Resumen: La evaluación precisa de los tejidos expuestos en una pieza dental constituye una tarea crucial para la evaluación, diagnóstico y monitorización de las patologías dentales. La inspección visual es un modo subjetivo de realizar un diagnóstico sobre el estado de salud dental. Los odontólogos clínicos evalúan y registran la presencia de cada tejido usando índices estandarizados. Una evaluación y monitorización más precisa puede lograrse al registrar de manera más detallada la identificación y medición de cada tipo de tejido dentario visible clínicamente. El principal objetivo de este trabajo es diseñar un sistema computacional de clasificación de tejidos dentarios con imágenes digitalizadas, con el propósito de evaluar de una manera precisa el estado de salud dental. Con este propósito los tejidos dentarios han sido detectados, segmentados y finalmente clasificados en imágenes digitales de piezas dentales vitales. Un procedimiento computacional de tratamiento de imágenes basado en el algoritmo de desviación de la media se ha implementado para realizar la segmentación de regiones en las imágenes de la base de datos; luego se extrajo un conjunto de parámetros característicos de cada una de estas regiones. Con estos datos se ha entrenado un sistema inteligente de clasificación basado en redes neuronales. La validación del sistema clasificador se ha realizado alimentando al sistema con imágenes con las que no se hubo realizado un entrenamiento o clasificación previa. Los resultados del trabajo sugieren que las técnicas de visión por computador y de inteligencia artificial vuelven más efectivo y preciso el proceso de identificación y clasificación de tejidos dentarios, por lo que pueden ser utilizadas como una herramienta eficaz para coadyuvar al proceso de diagnóstico del estado de salud dental.

Palabras clave: *Inteligencia computacional; tratamiento de imágenes digitales; clasificación de tejidos dentales; redes neuronales*

Abstract: Accurate assessment of exposed tissues in a tooth is a crucial task for the assessment, diagnosis and monitoring of dental diseases. Visual inspection is a subjective way of making a dental health diagnosis. Dentists evaluate and record the presence of each dental tissue using standardized indices. A more accurate assessment and monitoring can be achieved by recording more accurately the identification and measurement of each type clinically visible dental tissue. The main objective of this work is to design a computer system for classifying dental tissues in digital images, in order to accurately evaluate a state of dental health. For this purpose, the dental tissues were detected, segmented, and finally classified on digital images of vital teeth. A computational procedure for image processing based on the Mean Shift algorithm is implemented to perform the segmentation of the images in the database, and then a number of characteristic parameters were extracted of each of these regions. With these data, an intelligent classifier system based on neural networks was trained. The validation of the classifier system was performed by feeding the system with images that were not used in prior training or classification steps. The results of the work suggest that the techniques of computer vision and artificial intelligence become more effective and accurate the process of identification and classification of dental tissues, so it can be used as an effective tool to assist the process of diagnosing the state of dental health.

Keywords: *Computational intelligence; digital image processing; dental tissues classification; neural networks.*

Contenido

| | | |
|----|--|-------------------------------|
| 1. | Introducción | 9 |
| | <i>Caries dental</i> | 10 |
| | <i>Enfermedad periodontal</i> | 12 |
| | <i>Cáncer Bucal</i> | 14 |
| | <i>Leucoplasia bucal</i> | 15 |
| | <i>Eritroplasia bucal</i> | 16 |
| | <i>Fluorosis dental</i> | 17 |
| 2. | Estado del arte..... | 18 |
| | <i>Anatomía del diente y la cavidad bucal</i> | 18 |
| | Esmalte | 18 |
| | Dentina | 19 |
| | Pulpa..... | 19 |
| | Saliva..... | 19 |
| | <i>Procesamiento de imágenes digitales</i> | 19 |
| | Suavizado..... | 20 |
| | Segmentación de imágenes | 20 |
| | Segmentación de imágenes con Mean Shift | 21 |
| | Detección de bordes con Embedded Confidence | 22 |
| | El sistema EDISON | 23 |
| 3. | Nuestra propuesta..... | 23 |
| | <i>Metodología</i> | 23 |
| | Adquisición de las imágenes | 24 |
| | Suavizado..... | 25 |
| | Segmentación..... | 25 |
| | Extracción de descriptores | 26 |
| | Clasificación de tejidos | 27 |
| | Entrenamiento supervisado del sistema clasificador..... | 27 |
| 4. | Evaluación del sistema | 28 |
| 5. | Implementación | 29 |
| 6. | Conclusiones..... | 31 |
| | <i>Conclusiones del trabajo</i> | ¡Error! Marcador no definido. |
| | <i>Conclusiones del alumno</i> | ¡Error! Marcador no definido. |
| 7. | Referencias..... | 33 |

1. Introducción

Las enfermedades crónicas son los principales problemas de salud pública en la mayor parte del mundo. El patrón de enfermar se ha transformado en todo el mundo debido principalmente a los estilos de vida cambiantes, que incluyen las dietas ricas en azúcares, el consumo generalizado de tabaco y el aumento del consumo del alcohol. Además de los determinantes socio-ambientales; las enfermedades bucales están muy relacionadas con estos estilos de vida. Las enfermedades bucales son consideradas como uno de los principales problemas de salud pública debido a su alta prevalencia e incidencia en todas las regiones del mundo, y como en todas las enfermedades, la mayor carga es en las poblaciones desfavorecidas y marginadas socialmente. Las graves repercusiones en términos de dolor y sufrimiento, deterioro de la función y el efecto en la calidad de vida también debe ser considerado. El tratamiento de las enfermedades bucales es extremadamente costoso y no es factible en la mayoría de los países de ingresos bajos y medianos. La Organización Mundial de Salud (OMS) menciona que las enfermedades bucales son la cuarta causa más costosa de tratar.

En países de altos ingresos, la carga de la enfermedad oral se ha abordado mediante la creación de avanzados servicios de salud bucodental que ofrecen principalmente el tratamiento a los pacientes. La mayoría de los sistemas se basan en la demanda de atención recibida por los odontólogos privados. En la mayoría de los países de bajos e ingresos medios, la inversión en el cuidado de la salud oral es baja y los recursos se asignan principalmente a la atención oral de emergencia y alivio del dolor. De acuerdo con la OMS la Salud Bucal puede definirse como la ausencia de dolor orofacial crónico, cáncer de boca o garganta, úlceras bucales, defectos congénitos como labio leporino o paladar hendido, enfermedades periodontales, caries dental y pérdida de dientes, así como otras enfermedades y trastornos que afectan a la cavidad bucal.

Hay más de ciento veinte enfermedades sistémicas que se originan en la cavidad bucal. Las enfermedades bucales se han asociado con compromiso nutricional, cáncer, xerostomía, neumonía, bacteriemia, enfisema, problemas del corazón, diabetes, complicaciones en cirugía entre otras. Las enfermedades bucales aumentan el riesgo de enfermedades crónicas como las enfermedades cardiovasculares y cerebrovasculares, la diabetes mellitus y enfermedades respiratorias. Por otra parte, la vigilancia epidemiológica de las patologías bucales adquiere importancia en la medida en que aporta elementos útiles para la planificación, programación, organización, integración, control y dirección del Programa de Salud Bucal, al mismo tiempo que orienta la atención a la población.

La caries dental y la enfermedad periodontal son dos de los problemas más significativos de la salud bucal. Sin embargo no son las únicas enfermedades y trastornos que se presentan en la cavidad bucal, también existen los trastornos del desarrollo y de la erupción de los dientes (como la fluorosis dental), enfermedades de la pulpa, y los tejidos periapicales, anomalías dentofaciales, lesiones en la mucosa bucal, cáncer de la cavidad oral y maloclusiones que afectan a la población. A continuación se presenta una breve descripción de algunas de ellas.

Caries dental

En el último siglo, la investigación científica ha permitido establecer un concepto mucho más detallado de la naturaleza de la caries dental, ya que actualmente se reconoce que una cavidad es la última manifestación de una infección bacteriana. Las bacterias presentes en la boca forman una comunidad compleja que se adhiere a la superficie del diente en forma de una biopelícula, comúnmente denominada placa dental.

Una biopelícula cariogénica puede contener millones de bacterias, entre las cuales el estreptococo mutans es uno de los componentes críticos. Esta bacteria puede fermentar los hidratos de carbono para formar ácido láctico, los ciclos repetidos de la generación ácida pueden dar lugar a la disolución microscópica de minerales del esmalte del diente y a la formación de una mancha blanca o marrón opaca en la superficie del esmalte.

El desarrollo de la caries depende de la frecuencia en el consumo de carbohidratos, las características de los alimentos, el tiempo de exposición, eliminación de la placa y la susceptibilidad del huésped. Existen especies de lactobacilos, actinomicetos y otros estreptococos que generan ácidos dentro de la placa y pueden contribuir al proceso carioso. Si la infección de la caries en el esmalte no es controlada, la disolución ácida puede avanzar para formar una cavidad que se extienda a través del esmalte dental hacia el tejido pulpar, el cual contiene una gran cantidad de vasos sanguíneos y terminaciones nerviosas. En la figura 1 se muestra el desarrollo de una caries. En ella podemos ver cuatro imágenes.

La figura 1.a muestra una pequeña caries del esmalte. Se observa un ligero cambio de color en el diente debido a que se ve la dentina a través del esmalte. En esta situación la caries es aún indolora.

En figura 1.b vemos que la brecha se ha hecho más profunda, llegando a la dentina. Se produce ahora una caries de dentina. Se observa un color más amarillento y en este estado de caries aún no ha aparecido el dolor agudo en el diente que suele venir acompañado de un estado más avanzado.

En las figuras 1.c y 1.d se observa una caries en estado avanzado. Es ahora cuando aparece el dolor, formado por los gases que se acumulan dentro del diente y que presionan el nervio. Cuando la brecha se ensancha y se hace mucho mayor y, sobretodo, más ancha, el dolor remite puesto que los gases son libres de salir al exterior.

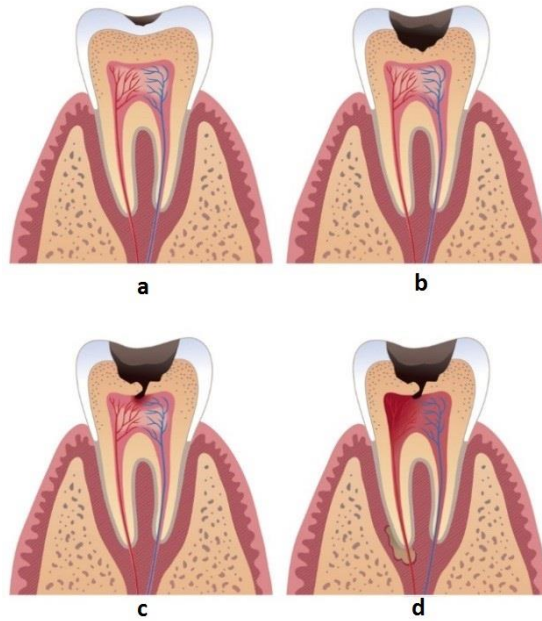


Figura 1. Desarrollo de una caries.

En la figura 2 se muestra una caries real en estado avanzado. Si en esta etapa no es controlada la infección de la pulpa, puede conducir al absceso, a la destrucción del hueso y a la extensión de la infección vía circulación sanguínea. La caries dental es un proceso dinámico donde se alternan periodos de desmineralización con periodos de remineralización, a través de la acción del fluoruro, calcio y fosfatos presentes en la saliva.



Figura 2. Caries en estado avanzado.

Aún no está clara la razón por la cual algunos individuos son más susceptibles que otros. Sin embargo, estas diferencias se refieren a diferentes factores:

- Las diferencias genéticas en la estructura, la bioquímica de las proteínas y de los cristales del esmalte.
- Las variaciones de las características y la cantidad de saliva.
- El mecanismo inmunológico de defensa.
- La influencia de aspectos socioeconómicos y culturales.

La caries dental se presenta con una serie de signos y/o síntomas (cavitación y/o dolor), afectando diferentes órganos dentarios y superficies dentales, las cuales pueden tener distintos grados de severidad. Es decir, la caries dental debe ser vista como un proceso acumulativo donde los factores de riesgo determinan el inicio del proceso, su avance, su evolución y la posibilidad de reversión en la primera fase del proceso.

Enfermedad periodontal

Es una infección causada por las bacterias presentes en la biopelícula (placa dental) que se forma en las superficies bucales y representa varias entidades nosológicas, su división básica se refiere a la gingivitis cuando se encuentra afectada la encía y la periodontitis, cuando los tejidos suaves y estructuras de soporte de los dientes están lesionados.

En la figura 3 se muestra el proceso de la enfermedad periodontal. En las figuras 3.a y 3.b se muestra una pieza dental sana y una pieza dental con gingivitis. Se observa en la encía un enrojecimiento. Este estado es indoloro pero muestra rastros de sangre cuando un objeto entra en contacto con la encía, como un cepillo de dientes, comida o la exploración manual.

En la figura 3.c se observa cómo la encía retrocede y deja el diente al descubierto en algunas zonas. Este estado es llamado periodontitis. Aumenta la sensibilidad al tacto pero por lo general no es un estado especialmente doloroso. En la figura 3.d se observa una enfermedad periodontal en estado avanzado. La encía ha dejado el diente en gran parte al descubierto. El diente corre peligro de caer y se observa corrosión en los laterales del diente, en el cemento.

Tanto la caries dental como la enfermedad periodontal se presentan con mayor frecuencia en los adolescentes y adultos, el porcentaje de individuos con periodontitis moderada o severa se incrementa con la edad.

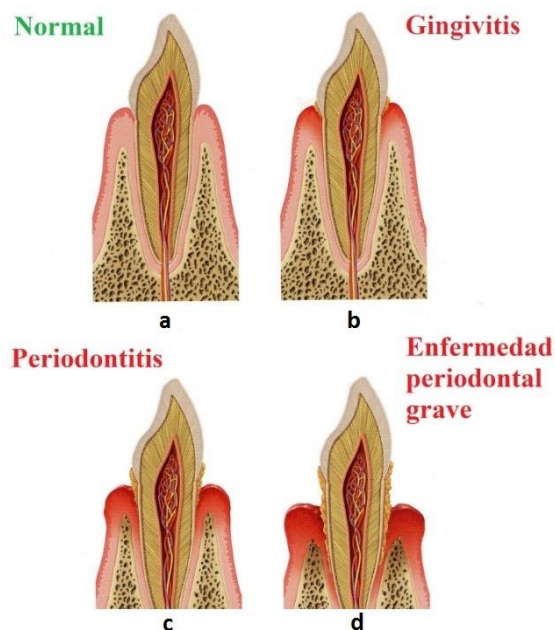


Figura 3. Evolución de la enfermedad periodontal

Una vez visto, de forma general, el proceso de la enfermedad periodontal, vamos a proceder a explicarla más detallada. La gingivitis es la inflamación de la encía y se caracteriza por cambios en la coloración (comúnmente de un rosa pálido a un rojo brillante), se presenta edema y sangrado, además de alterarse la consistencia tisular. Estos cambios son el resultado de la acumulación de placa dental a lo largo del margen gingival y de la respuesta inflamatoria del sistema inmune a la presencia de productos bacterianos.

Los cambios iniciales de la gingivitis son reversibles con una adecuada higiene bucal, de lo contrario, éstos pueden llegar a ser más severos con la infiltración de células inflamatorias y el establecimiento de una infección crónica. Puede persistir por meses y hasta años la infección gingival, sin progresar a periodontitis. La biopelícula presente en las superficies de los dientes que se encuentran cerca de las salidas de las glándulas salivales, a menudo se mineraliza y forma cálculo o tártaro. Esta combinación puede exacerbar la respuesta local inflamatoria. Existen numerosos estudios para establecer cuáles son los organismos causantes de la gingivitis, los más frecuentes asociados son *Fusobacterium nucleatum*, *Veillonella parvula*, así como especies de *Campylobacter*, además de *Treponema*; sin embargo, ha sido complejo definir clara y consistentemente a un solo grupo asociado a la gingivitis.

La inflamación gingival puede ser influida por hormonas esteroideas, originando diferentes tipos de gingivitis como es la juvenil, del embarazo y la asociada a la administración de medicamentos para el control de la natalidad. La presencia de éstas en los tejidos adyacentes a la biopelícula aparentemente estimula el crecimiento de ciertas bacterias y desencadena una exagerada respuesta a la acumulación de placa dental.

Ciertos fármacos, como los antiepilépticos y algunos inmunosupresores también pueden inducir el crecimiento excesivo gingival y la inflamación. La periodontitis representa eventos moleculares y tisulares avanzados con un daño en la estructura del periodonto prácticamente

irreversible; en su avance involucra regiones anatómicas y crea deformaciones estructurales severas en la unidad dentogingival y en la unidad dentoalveolar que requieren de la intervención del especialista.

La severidad de la enfermedad periodontal es determinada a través de una serie de signos que incluyen la extensión de la inflamación, hemorragia, profundidad de la bolsa, pérdida de inserción del ligamento y de tejido alveolar óseo adyacente, el cual se determina mediante evaluación clínica y rayos-X (figura 4).



Figura 4. Enfermedad periodontal en estado avanzado.

La mayoría de los investigadores concuerdan en que la periodontitis es el resultado de una infección mixta, en particular de bacterias gram negativas como *Porphyromonas gingivalis*, *Prevotella intermedia*, *Bacteroides forsythus*, *Treponema denticola* y *Actinobacillus actinomycetemcomitans*.

Su papel en la iniciación y progreso de la enfermedad es determinado en parte por su “factor virulento”, como la habilidad para colonizar la placa subgingival, la generación de productos que puedan directamente dañar a los tejidos, así como el producir una respuesta inmunológica inflamatoria.

La susceptibilidad a desarrollar periodontitis se ha explorado en cuanto a:

- Hábitos: como el uso del tabaco donde el riesgo de pérdida de hueso alveolar para los fumadores es 7 veces más grande que para los que no fuman.
- Presencia de enfermedades sistémicas: en donde se ha encontrado que los pacientes con diabetes tipo 1 y 2 son más susceptibles a las enfermedades periodontales.

Cáncer Bucal

Se han identificado dos tipos de lesiones con potencial de convertirse en lesiones cancerosas (leucoplasia y eritroplasia), por lo que se requiere identificar oportunamente su recurrencia y comportamiento.

Así que cualquier lesión blanca ó roja que no se resuelva por sí misma en tres semanas deberá ser evaluada y considerar la obtención de una biopsia para realizar un diagnóstico definitivo.

El carcinoma de células escamosas, es la lesión maligna oral más común, lo cual presenta a menudo un desafío de diagnóstico clínico para el odontólogo, particularmente en su etapa inicial de desarrollo. La mayoría de los cánceres se asocian a una historia de tabaquismo y alcoholismo. Por lo tanto, el dentista debe realizar una historia clínica completa así como la detección de cáncer bucal.

Otros signos y síntomas que deben tomarse en cuenta:

- Un abultamiento o engrosamiento del tejido blando de la boca
- Dificultad para masticar o deglutir la comida
- Dolor en el oído
- Dificultad al mover la mandíbula o la lengua
- Adormecimiento de la lengua u otra área de la boca

Leucoplasia bucal

La más común de las lesiones premalignas es la leucoplasia bucal, que se define como “una placa o mancha blanca presente en cualquier lugar de la mucosa bucal, que no puede ser caracterizada como ninguna otra entidad blanca en donde el tejido se encuentra morfológicamente alterado” (figura 5).



Figura 5. Leucoplasia bucal.

El diagnóstico de la leucoplasia es principalmente clínico, se realiza por exclusión de otras entidades blancas como la queratosis friccional, el liquen plano, así como la candidosis hiperplásica.

Clínicamente la leucoplasia se subdivide en los siguientes tipos morfológicos: leucoplasia homogénea y no homogénea. La primera se describe como una placa uniformemente blanca, a menudo con superficie lisa o rugosa. La segunda consiste en placas blancas combinadas con

eritema, erosiones y nódulos; comúnmente se denomina leucoplasia moteada o nodular. Cabe mencionar que este tipo de lesiones no son desprendibles y permanecen en la boca por más de dos semanas.

Eritroplasia bucal

La eritroplasia es otra lesión potencialmente maligna menos frecuente que la leucoplasia. Es una mácula de color rojo aterciopelado, que no puede ser diagnosticada como otra lesión roja específica y no puede ser atribuida a causas traumáticas, vasculares o inflamatorias (Figura 6).



Figura 6. Eritroplasia bucal

Es una lesión asintomática que ocurre en toda la mucosa bucal y se puede presentar en:

- El borde bermellón del labio inferior.
- En el vientre y bordes laterales de la lengua.
- El piso de la boca.
- Frecuentemente involucra el paladar blando.

Sus variantes clínicas son la forma homogénea y no homogénea. La primera es una mancha o placa roja aterciopelada bien delimitada con superficie lisa, en tanto la segunda puede presentar granulaciones blancas o nódulos queratósicos en su superficie, cambios similares a los que presenta la leucoplasia.

Fluorosis dental

Se reconoce ampliamente que el fluoruro controla eficazmente la caries dental, acelerando la remineralización de las lesiones incipientes del esmalte o bien alterando la glucólisis (proceso por el cual las bacterias cariogénas metabolizan los hidratos de carbono para producir ácido). Sin embargo, ésta es una hipocalcificación del esmalte dental o de la dentina producida por una ingestión crónica de cantidades excesivas de fluoruro durante el periodo de desarrollo dentario.

Clínicamente, varía en apariencia desde pequeñas líneas blancas en la superficie del esmalte (visibles únicamente en la revisión cercana), que no alteran la estructura dentaria, hasta manchas oscuras (pardas con estrías y/o punteado que lesionan la morfología dentaria, figura 7). Es más frecuente en la dentición permanente, suele manifestarse con mayor gravedad en los dientes que se mineralizan ulteriormente; asimismo, los dientes homólogos presentan un grado de afectación semejante.



Figura 7. Fluorosis dental

En la fluorosis, la función ameloblástica se caracteriza por una interrupción del depósito de la matriz orgánica que trae como resultado la formación de prismas de esmalte irregulares.

La presencia de fluorosis dental varía de acuerdo a los factores extrínsecos como son: zona geográfica, temperatura, clima, dieta, edad en que el individuo ha consumido el flúor, tiempo de consumo, concentración ingerida, frecuencia de ingestión y altitud de la localidad.

2. Estado del arte

Vamos a proceder a revisar la morfología del diente y algunos procesos de procesamiento de imágenes que se utilizan actualmente para realizar esta labor. Nos centraremos en los procesos que hemos utilizado para el desarrollo de nuestro sistema y lo explicaremos brevemente así como el contexto en el que se han desarrollado.

Anatomía del diente y la cavidad bucal

El diente es un órgano duro, blanco y liso que sirve básicamente para masticar los alimentos. Está constituido macroscópicamente por tres partes: la corona, o porción situada por encima de la encía; la raíz, o porción situada por debajo de la encía, y el cuello, zona de separación entre la corona y la raíz. El esmalte, la dentina y la pulpa son los tejidos dentarios, y la encía es el tejido peridentario blando que se adhiere al cuello de los dientes, toma su forma y texturas definitivas con la erupción de los dientes (figura 8).

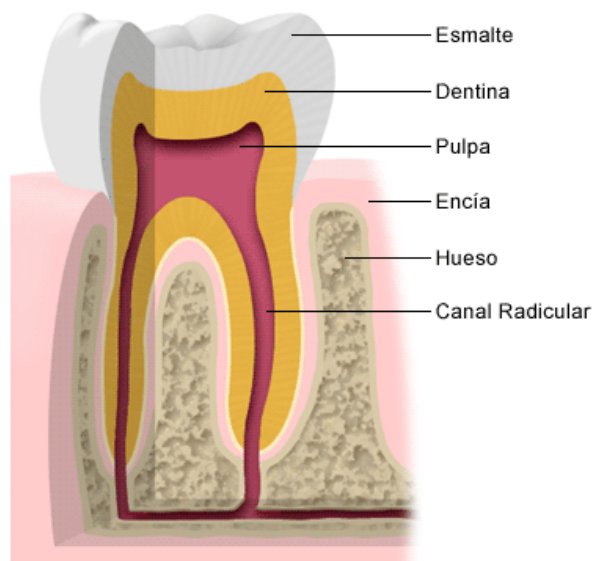


Figura 8. Estructura de una pieza dental.

Esmalte

Es el tejido más duro y calcificado del organismo, lo que justifica su acción protectora. Constituye la superficie exterior de la corona y su grosor aumenta a partir del cuello. El esmalte completamente formado está libre de sensaciones dolorosas, ya que carece de vasos y nervios.

Dentina

Constituye el tejido más voluminoso del diente, se encuentra debajo del esmalte y está dispuesta en el diente, desde la corona hasta la raíz. A diferencia del esmalte, la dentina da una respuesta dolorosa ante estímulos físicos y químicos, especialmente si la capa protectora del esmalte se altera.

Pulpa

Es la zona más interna del diente, está formada por un tejido blando conjuntivo, irrigado por vasos sanguíneos e innervado por fibras nerviosas, que al ser extremadamente sensibles pueden originar dolor dental.

Saliva

Secretada por diferentes glándulas salivales, es un líquido alcalino, claro y viscoso. Entre sus funciones principales destacan: humedecer y lubricar los alimentos; arrastrar restos celulares y desechos alimentarios, lo que contribuye a una limpieza de los dientes; posee una amplia acción bacteriana; amortigua la acción de los ácidos producidos por los microorganismos de la placa dental y, finalmente, contribuye a la remineralización de la superficie del esmalte por su alto contenido en iones de calcio, flúor y fosfato.

Procesamiento de imágenes digitales

El procesamiento de imágenes tiene como objetivo mejorar la calidad de imágenes o facilitar la localización de ciertos detalles que se quieren resaltar. La imagen puede haber sido generada de muchas maneras, por ejemplo, por medio de fotografías digitales o por medio de un computador (figura 9).



Figura 9. Imagen procesada digitalmente

La utilidad del procesamiento de imágenes es muy amplia y abarca muchos campos, tanto en ingeniería, como en medicina, física, química y biología; entre estos, uno de los campos de más rápido desarrollo es el de diagnóstico médico.

De manera general, los profesionales médicos se entrenan durante muchos años para identificar las características que poseen estas imágenes con el objetivo de emitir un diagnóstico. Las imágenes provenientes de muestras de seres vivos, obtenidas tanto por métodos de fotografía digital, radiografía, tomografía, resonancia magnética, entre otras; son de naturaleza irregular, por lo que el procesamiento de las mismas requiere de la aplicación de múltiples técnicas computacionales, siendo las más importantes el suavizado y la segmentación de regiones.

Suavizado

El proceso de filtrado o suavizado es el conjunto de técnicas cuyo objetivo fundamental es obtener, a partir de una imagen origen, otra final cuyo resultado sea más adecuado para una aplicación específica, mejorando ciertas características de la misma que posibiliten efectuar operaciones del procesado sobre ella. Los principales objetivos que se persiguen con la aplicación de filtros son suavizar la imagen, eliminar el ruido, realzar bordes o detectar bordes. En la figura 10 se puede observar el suavizado de una imagen.



Figura 10. Suavizado de imágenes

Segmentación de imágenes

La segmentación de una imagen consiste en la división o partición de la imagen en varias zonas o regiones homogéneas y disjuntas a partir de su contorno, su conectividad, o en términos de un conjunto de características de los píxeles de la imagen que permitan discriminar unas regiones de otras. Los tonos de gris, la textura, los momentos, la magnitud

del gradiente, la dirección de los bordes, las modas de los tonos de gris en ventanas 3x3, 7x7 y 15x15, etc., son características a utilizar para la segmentación. Se puede observar un ejemplo en la figura 11.

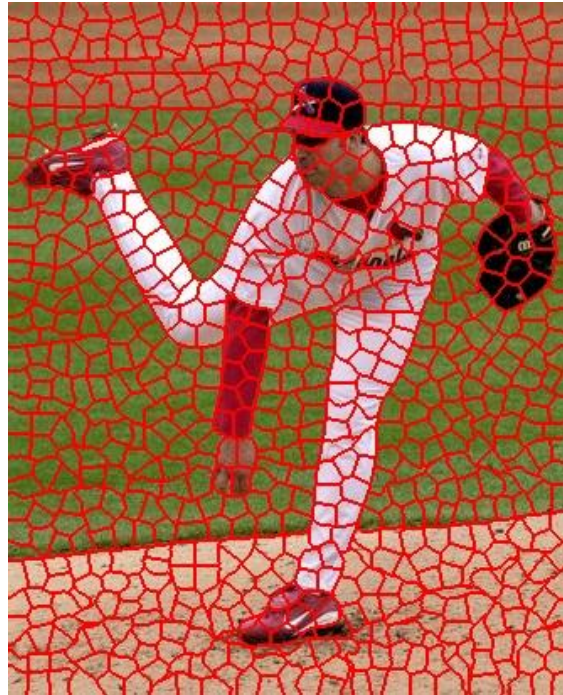


Figura 11. Imagen segmentada

La operación de segmentación trata de distinguir si un píxel pertenece, o no, a un objeto de interés y, por lo tanto, produce una imagen binaria. Todavía no hay una teoría unificada de la segmentación de imágenes, solamente disponemos de un conjunto de algoritmos.

Segmentación de imágenes con Mean Shift

En nuestro trabajo vamos a utilizar la segmentación de imágenes por medio del algoritmo Mean Shift [8]. Un amplio grupo de algoritmos de segmentación de imágenes se basan en el análisis de características según el espaciado. En el paradigma usado en el mean shift, los píxeles son mapeados en un espacio a color y agrupados, donde cada grupo delinea con regiones homogéneas de la imagen. En las técnicas tradicionales de agrupamiento el espacio de características es modelado como una mezcla entre distribuciones normales multivariadas, que pueden introducir errores debidos a la forma elíptica impuesta sobre los grupos o debido a un error en la determinación de su número.

El algoritmo mean shift está basado en característica no parametrizadas de análisis del espacio que elimina estos errores. Cuando el algoritmo mean shift es aplicado a cada punto del espacio de características, los puntos de convergencia se agregan en grupos que pueden ser combinados. Estos son los modos detectados y los puntos de datos asociados definen su cuenca de atracción. Los grupos se delinear por los límites de las cuencas, y por lo tanto pueden tener formas arbitrarias. El número de grupos importantes presentes en el espacio de

características es automáticamente determinado por el número de modos significativos detectados.

En el algoritmo de segmentación del color, se usa un espacio de características de cinco dimensiones. Se emplea el espacio de color $L^*u^*v^*$ ya que sus métricas son una aproximación satisfactoria al método euclídeo, además de permitir el uso de ventanas esféricas. Las dos dimensiones restantes son el entramado de coordenadas.

La calidad de la segmentación está controlada por el espaciado h_s y por el color h_r . El algoritmo de segmentación consta de dos grandes pasos. En el primero, la imagen es filtrada usando el modo de mean shift de cinco dimensiones, reemplazando el valor de cada píxel con el proceso de tres dimensiones (color), componente del modo de cinco dimensiones al que está asociado. En el segundo paso, las cuencas de atracción de los modos, localizadas dentro de $h_r/2$ en el espacio de color son recursivamente fusionadas hasta converger.

El amplio resultado de cuencas de atracción son las regiones delimitadas, y el valor de todos los píxeles dentro se establecen como su promedio. Estos píxeles son directamente asociados al modo al que se ha convergido. La aproximación no implica un cambio visible en la imagen filtrada. En el paso de la fusión, se hizo uso de grafos de adyacencia de regiones (RAG) y contracción de grafos con un algoritmo de hallazgo-unión.

El RAG inicial se construye a partir de una imagen filtrada, los modos son los vértices del grafo y los ejes son definidos en base a cuatro conexiones en el entramado.

La fusión se lleva a cabo como una operación de cierre transitivo en el grafo, con la condición de que la diferencia de color entre dos nodos adyacentes no debe exceder $h_r/2$. En la convergencia, el color de las regiones se recalcula y el cierre transitivo se realiza de nuevo. Después de un máximo de tres iteraciones se obtiene el etiquetado final de la imagen (segmentación). Se asignan regiones pequeñas (el tamaño mínimo, M se define por el usuario) al vecino más cercano en el espacio de color.

Hay que tener en cuenta que este paso de postprocesado se puede refinar mediante el empleo de una tabla de consulta que captura la relación entre la diferencia de color significativa más pequeña y el tamaño de la región mínimo.

Detección de bordes con Embedded Confidence

La detección de bordes es, quizá, la técnica más estudiada en cuanto a los operadores de visión a bajo nivel. Mientras que hay numerosas técnicas propuestas, hoy día una de las más usadas es la de detección de bordes basadas en el gradiente. Se compone de tres procesos aplicados en secuencia: estimación del gradiente, supresión nonmaxima y el umbral de histéresis. El mapa de bordes se deriva de la entrada en función de dos umbrales de magnitud del gradiente. No obstante, usar la magnitud del gradiente para las decisiones causa una deficiencia, los bordes afilados con pequeñas magnitudes pueden ser detectados sólo a expensas de permitir que una gran cantidad del borde se pierda. Una generalización

recientemente propuesta del procedimiento de detección de bordes basado en el gradiente elimina este hecho.

El sistema EDISON

Estas técnicas mencionadas anteriormente han sido integradas en el sistema EDISON, que se ha usado en las librerías utilizadas con Matlab en este proyecto[8].

3. Nuestra propuesta

Los tejidos dentarios están ordenados por capas, cada uno de los cuales posee características individualizadoras que permiten a los odontólogos realizar una clasificación visual de los mismos. La evaluación precisa de los tejidos expuestos en una pieza dental constituye una tarea crucial para la evaluación, diagnóstico y monitoreo de las patologías dentales. Los odontólogos clínicos usualmente evalúan y registran cada observación usando índices estandarizados, los cuales están basados principalmente en la inspección visual junto con otros datos relevantes sobre el estado de salud general del paciente.

Los sistemas de clasificación visuales han sido desarrollados para proveer a los clínicos, epidemiólogos e investigadores de un método basado en evidencias para recolectar datos de manera estandarizada en diferentes ambientes y lograr una comparación efectiva entre ellos. Uno de los sistemas de clasificación más usados en la actualidad es el ICDAS [1] [2].

Una evaluación y monitorización más precisa puede lograrse al registrar de manera más detallada la identificación y medición de cada tipo de tejido dentario visible clínicamente. La inspección visual constituye un modo muy subjetivo de realizar un diagnóstico sobre el estado de la salud dental, como se demuestra por la validación de la confiabilidad inter-observador [3]

Las técnicas de visión por computador y de inteligencia artificial vuelven más efectivo y preciso el proceso de identificación, segmentación y clasificación de tejidos. Los estudios actuales en la clasificación de tejidos biológicos se concentran en la identificación de tejidos mediante diferentes técnicas de segmentación como umbral de histograma, watershed, desviación de la media, crecimiento de regiones, árboles de decisión, muchas veces combinados con técnicas de inteligencia computacional. [4] [5] [6]

El principal objetivo de este trabajo es diseñar un sistema computacional de clasificación de tejidos dentarios con imágenes digitalizadas, redes neuronales y clasificadores bayesianos, para evaluar el estado de salud dental, mediante un proceso de detección, segmentado, clasificación y medición de los tejidos dentarios.

Metodología

El modelo computacional propuesto para la clasificación de los tejidos dentales expuestos consiste en cinco etapas, como muestra la figura 12. En la primera etapa la imagen de una pieza dental es capturada, la segunda etapa consiste en el suavizado de la imagen para reducir las irregularidades, en la tercera etapa se realiza la segmentación de la imagen, en la cuarta

etapa se extrae descriptores de color y textura de la imagen procesada y finalmente en la quinta etapa los diferentes tejidos expuestos son clasificados mediante redes neuronales.

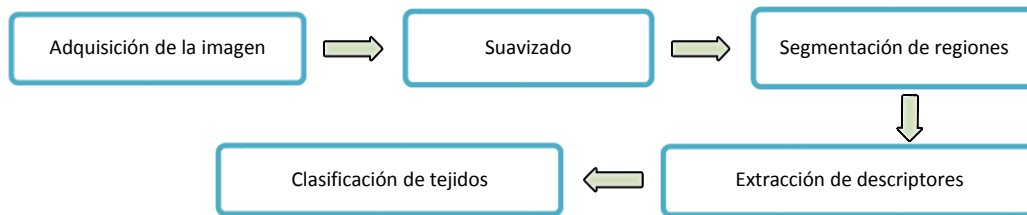


Figura 12. Secuencia para clasificar los tejidos dentales visibles en imágenes digitales

Para este estudio se ha considerado trece tipos diferentes de tejidos observables en las imágenes digitales de piezas dentales adquiridas. Estos son: tejido necrótico, pulpa dental, caries de la dentina, caries del esmalte, dentina esclerótica, dentina saludable, esmalte desmineralizado, esmalte sano, metal, material compuesto, obturación provisional, encía y epitelio oral. Aunque el metal, el material compuesto y la obturación provisional no son tejidos biológicos se los ha considerado como parte de los tejidos clasificables dado que estos materiales se emplean para reemplazar tejidos dentarios perdidos y se encuentran presentes en una gran cantidad de los casos.

Adquisición de las imágenes

El primer paso es la generación de una base de datos de imágenes digitales de piezas dentales (figura 13). Las imágenes fueron adquiridas mediante fotografías digitales tomadas en clínica de odontología restauradora de la Facultad de Odontología en la Universidad de Guayaquil-Ecuador. Para esta tarea se empleó una cámara digital Nikon 3100 en combinación con un flash circular Sigma EM-140 para prevenir la aparición de reflejos o sombras en las imágenes. Las fotografías fueron tomadas en color, con un tamaño de 1632 x 1224 píxeles, con la supervisión de odontólogos clínicos.

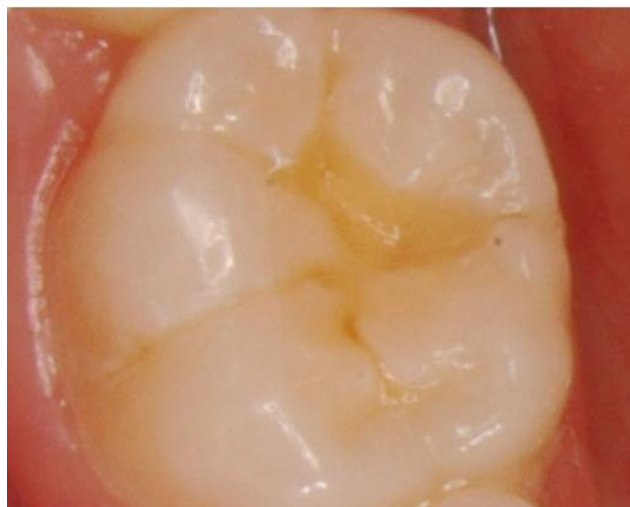


Figura 13. Imagen de una pieza dental

Suavizado

Dado que los órganos dentales tienen características visuales irregulares se determinó emplear un procedimiento de tratamiento de imágenes basado en desviación de la media. Este procedimiento es altamente confiable para realizar el suavizado de la imagen preservando los bordes. [7]

Para minimizar los efectos de los reflejos lumínicos se aplicó un filtro de media móvil a las imágenes previo al proceso de suavizado, y para reducir la complejidad del proceso se redujo el tamaño de todas las imágenes a 816 x 612 píxeles.

En este proceso de suavizado se reconocen dos dominios básicos: el dominio espacial y el dominio del color. Cada píxel de la imagen es convertido en un vector que incluye los componentes de color y espacio, en el espacio de color L^*u^*v .

Segmentación

Una vez que las imágenes fueron suavizadas se empleó un algoritmo de crecimiento de regiones para el proceso de segmentación de las imágenes. Los resultados de este proceso pueden apreciarse visualmente en las figuras 14, 15 y 16. El promedio de regiones extraídas en este estudio fue de 150 por imagen.

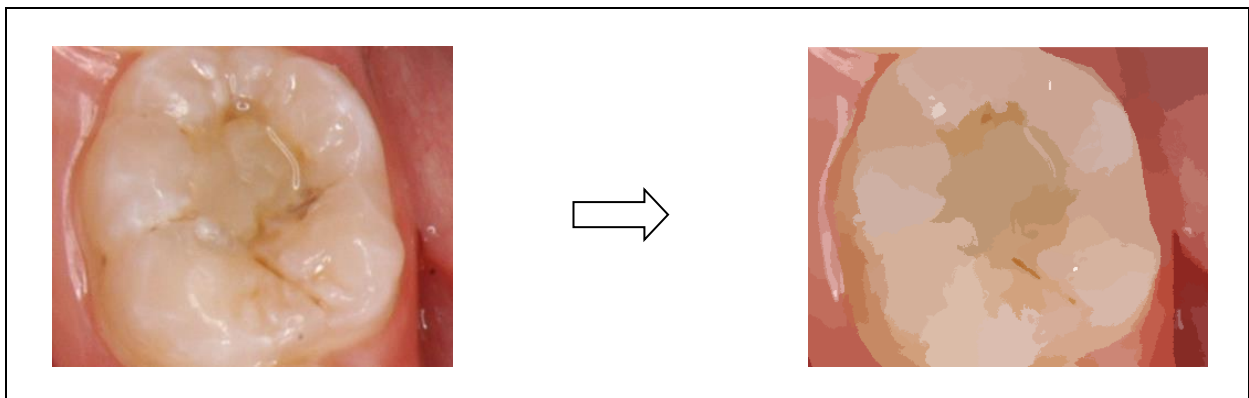


Figura 14. Representación del proceso de suavizado y segmentado por Main Shift

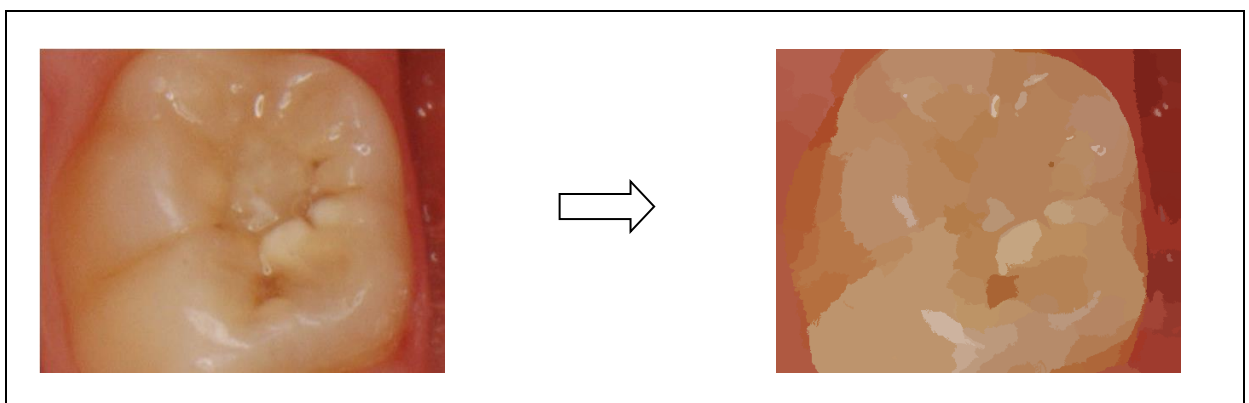


Figura 15. Representación del proceso de suavizado y segmentado por Main Shift

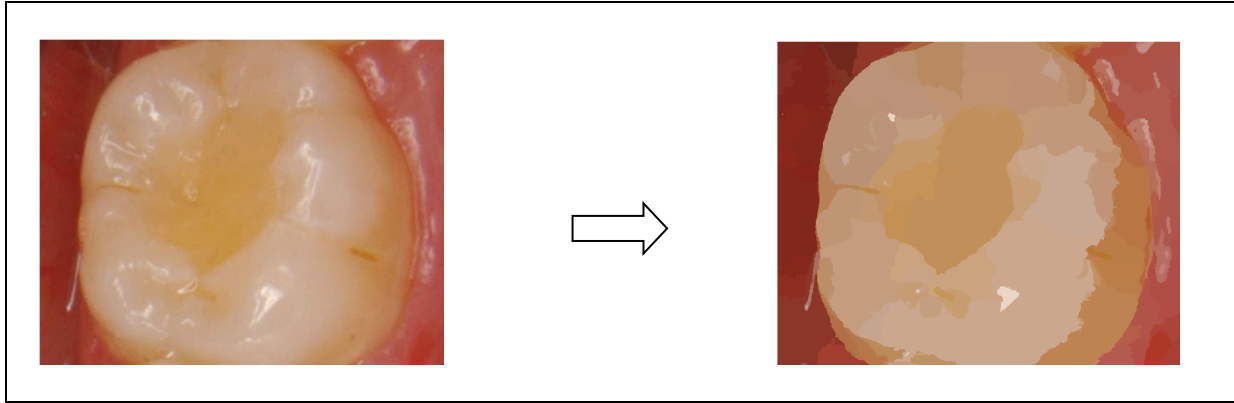


Figura 16. Representación del proceso de suavizado y segmentado por Mean Shift

Tras la segmentación de las imágenes, se extrajo un conjunto de características de color y textura de cada una de las regiones significativas. Tres tipos de modelos de color fueron usados para esta tarea: L^*u^*v , RGB y RGB normalizado.

Extracción de descriptores

Tres tipos de características fueron obtenidas de cada imagen: en primer lugar se extrajeron descriptores de color de los píxeles de la imagen, en segundo lugar las características de color extraídas de los histogramas de la imagen y finalmente los descriptores de textura.

Los descriptores de color de los píxeles de la imagen fueron computados como la media y la varianza de cada componente de color tanto del espacio L^*u^*v como del RGB normalizado. Las características extraídas de los histogramas de las imágenes de los espacios RGB y RGB normalizado fueron los dos picos más altos luego de un filtro de medias móviles [5], el nivel con el 50% de amplitud máxima en un histograma de orden creciente, la varianza, la asimetría, la energía y la entropía. La asimetría fue calculada de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^n \frac{(h_i - \mu)^3}{(n-1)\sigma^3}. \quad (1)$$

La energía fue calculada como:

$$\sum_{i=1}^n h_i^2. \quad (2)$$

Finalmente la entropía fue calculada como:

$$-\sum_{i=1}^n h_i \log_2(h_i). \quad (3)$$

Para la extracción de texturas se aplicó un filtro wavelet a cada uno de los canales RGB de las imágenes mediante una función de Daubechies de cuarto orden. También se aplicó un filtro wavelet de segundo orden a la imagen de aproximación (LL). En cada sub-banda resultante del filtrado por wavelet se computó la energía por elemento en cada región como:

$$\left(\frac{1}{\text{area}}\right) \sum_{p \in \text{Region}} p^2. \quad (4)$$

Clasificación de tejidos

El sistema clasificador basado en redes neuronales fue diseñado a manera de un sistema secuencial organizado como una cascada de clasificación binaria. Para este trabajo se empleó una arquitectura de cascada de 12 pasos, como se describe a continuación:

1. Un set de k redes neuronales entrenadas para identificar tejido necrótico entre otros tipos de tejidos posibles.
2. Un nuevo set de redes neuronales entrenadas en la misma manera se emplea para separar el tejido de tipo “pulpa dental”.
3. Un nuevo set de redes neuronales entrenadas en la misma manera se emplea para separar el tejido de tipo “caries de la dentina”.
4. Un nuevo set de redes neuronales entrenadas en la misma manera se emplea para separar el tejido de tipo “caries del esmalte”.
5. Un nuevo set de redes neuronales entrenadas en la misma manera se emplea para separar el tejido de tipo “dentina esclerótica”.
6. Un nuevo set de redes neuronales entrenadas en la misma manera se emplea para separar el tejido de tipo “dentina saludable”.
7. Un nuevo set de redes neuronales entrenadas en la misma manera se emplea para separar el tejido de tipo “esmalte desmineralizado”.
8. Un nuevo set de redes neuronales entrenadas en la misma manera se emplea para separar el tejido de tipo “esmalte sano”.
9. Un nuevo set de redes neuronales entrenadas en la misma manera se emplea para separar el tejido de tipo “metal”.
10. Un nuevo set de redes neuronales entrenadas en la misma manera se emplea para separar el tejido de tipo “material compuesto”.
11. Un nuevo set de redes neuronales entrenadas en la misma manera se emplea para separar el tejido de tipo “obturación provisional”.
12. Finalmente un nuevo set de redes neuronales entrenadas en la misma manera se emplea para separar el tejido de tipo “encía”, dejando solamente tejido del “epitelio oral” como residuo del proceso de clasificación.

Entrenamiento supervisado del sistema clasificador

El proceso de clasificación fue establecido de manera que cada región segmentada pertenece solamente a una clase específica de tejido. Un grupo de cinco dentistas clínicos expertos realizó la clasificación manual cada una de las regiones segmentadas de las imágenes mediante

una interfaz gráfica de usuario especialmente diseñada para esta tarea, la cual puede observarse en la Figura 17. Con esta herramienta, a cada región segmentada se le fue asignada una etiqueta correspondiente a uno de los trece posibles tipos de tejido. Estas etiquetas constituyen las salidas deseadas durante el proceso de entrenamiento del clasificador por redes neuronales.



Figura 17. Interfaz gráfica empelada para la clasificación manual de las regiones segmentadas

Los datos de entrada de las regiones segmentadas se dividieron en 10 subgrupos independientes. Las regiones segmentadas provenientes de la misma imagen siempre fueron ubicadas en el mismo subgrupo. Luego se empleó un procedimiento de validación cruzada para generar un conjunto de redes neuronales. Para tener una estimación precisa del error de generalización en cada paso de la validación cruzada se tomó uno de los diez subgrupos como conjunto de prueba. Cada uno de los otros nueve subgrupos se tomó por turnos como conjunto de validación, mientras que los ocho subgrupos restantes fueron usados para entrenar una red neuronal. Se empleó un mecanismo de error basado en el error cuadrático medio en el conjunto de validación para prevenir el sobre-entrenamiento.

4. Evaluación del sistema

Las doce etapas de la clasificación binaria descritas en la sección de metodología fueron aplicadas para clasificar automáticamente las regiones segmentadas en imágenes digitales de piezas dentales. La Tabla 1 muestra las tasas de rendimiento parcial y general del sistema de redes neuronales durante el proceso de entrenamiento mediante validación cruzada. Para obtener estos resultados el sistema solo clasificó regiones segmentadas que no hubieran sido usadas previamente en el proceso de entrenamiento.

Para cada tipo de tejido la sensibilidad fue calculada como el porcentaje de regiones simultáneamente marcadas como un tipo específico de tejido tanto por el sistema clasificador como por los expertos; la especificidad se calculó como el porcentaje de regiones simultáneamente clasificadas como no pertenecientes a cierto tipo de tejido tanto por el sistema clasificador como por los expertos. El porcentaje de éxito se representará como el promedio

entre la sensibilidad y especificidad. Finalmente la precisión será la proporción global de regiones correctamente clasificadas entre todos los tipos de tejidos.

La mayor sensibilidad alcanzada fue al clasificar el tejido de la encía, luego le sigue la caries de la dentina y el epitelio oral. Asimismo, el sistema clasificador logró su mayor precisión con la encía, seguido por la caries de la dentina y el epitelio oral. El sistema clasificador obtuvo un bajo rendimiento al clasificar el esmalte desmineralizado y la dentina esclerótica.

TABLA 1. TASAS DE RENDIMIENTO PARCIAL Y GENERAL DEL SISTEMA CLASIFICADOR

| <i>Tipo de tejido</i> | <i>Sensibilidad (%)</i> | <i>Especificidad (%)</i> | <i>Éxito (%)</i> | <i>Precisión (%)</i> |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------|----------------------|
| Tejido necrótico | 78% | 74% | 76% | 75% |
| Pulpa dental | 63% | 40% | 52% | 59% |
| Caries de la dentina | 86% | 79% | 82% | 80% |
| Caries del esmalte | 78% | 78% | 78% | 78% |
| Dentina esclerótica | 39% | 20% | 29% | 33% |
| Dentina saludable | 72% | 63% | 67% | 70% |
| Esmalte desmineralizado | 28% | 25% | 26% | 27% |
| Esmalte sano | 79% | 67% | 73% | 77% |
| Metal | 77% | 76% | 76% | 76% |
| Material compuesto | 72% | 68% | 70% | 71% |
| Obturación provisional | 37% | 33% | 35% | 35% |
| Encía | 94% | 92% | 93% | 94% |
| Epitelio oral | 86% | 71% | 78% | 78% |

5. Implementación

La implementación del sistema se ha realizado por medio de Matlab 2013a. Se ha utilizado la API de matlab mex, que es una adaptación a matlab del sistema Edison[8] (desarrollado en C++). Para las redes neuronales se ha utilizado Neuronal Network Toolbox y para el procesamiento de imágenes Image Processing Toolbox. Para realizar la interfaz se ha utilizado GUIDE.

La interfaz consta de una única ventana desde la que haremos todo. Lo primero que se ve es la ventana sin ninguna imagen cargada, con un logo de la Universidad de Málaga. A la derecha tenemos una serie de botones que enumeran cada una de las características que se quieren obtener de las imágenes de piezas dentales. También hay dos flechas, por si se comete un error a la hora de catalogar una región poder volver atrás.

Debajo de la imagen del logo o, en su caso, de la pieza dental, tenemos unos controles con un botón de cargar y un campo de texto en el que meteremos el número de muestra que

queremos cargar. También tenemos a la derecha el número de región y el tejido asignado, si lo hubiere. Todo esto se puede observar en la figura 18.



Figura 18. Pantalla principal de la interfaz

Una vez carguemos una imagen, aparecerá una pieza dental en la pantalla con una sección bordeada por una línea azul (figuras 19, 20, 21 y 22). El odontólogo deberá seleccionar de entre las categorías la que se corresponda con lo que se ve en la imagen.



Figura 19. Imagen de una pieza dental con una región de esmalte resaltada



Figura 20. Imagen de una pieza dental con una región de dentina resaltada



Figura 21. Imagen de una pieza dental con una región de sarro resaltada



Figura 22. Imagen de una pieza dental con una región de caries de dentina resaltada

Internamente se obtendrá también una serie de imágenes enmascaradas por regiones, según cada uno de los atributos que se pueden observar en la aplicación. Así, si por ejemplo se quiere observar el esmalte (figura 23) o las caries (figura 24) de una pieza se obtendrá una imagen con la zona en concreto resaltada tal como sigue en las siguientes fotografías:

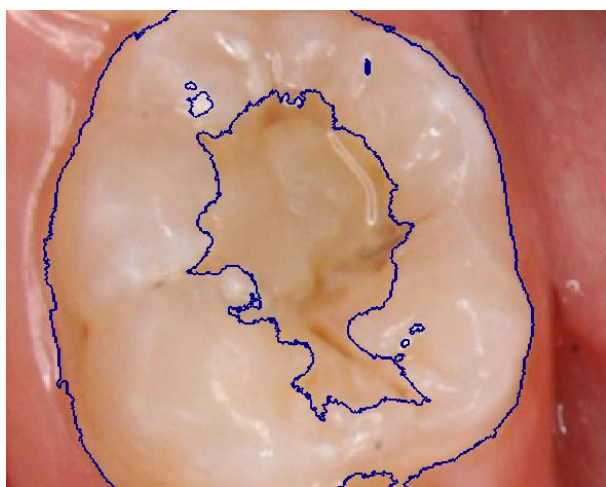


Figura 14. Imagen de una pieza dental con zona enmascarada del esmalte

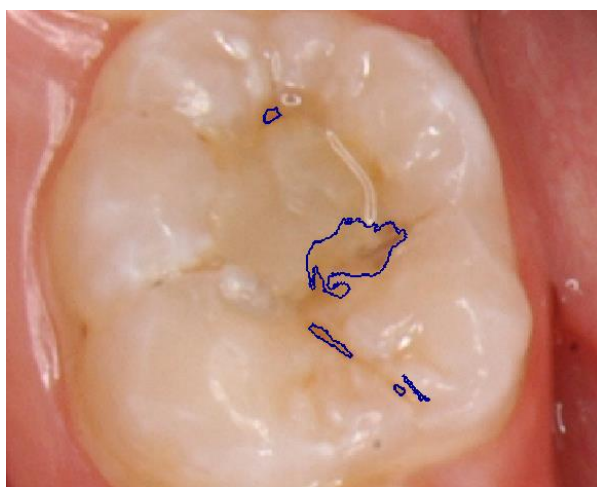


Figura 15 Imagen de una pieza dental con zona enmascarada de las caries

6. Conclusiones

En este trabajo se pueden extraer dos conclusiones, unas primeras a nivel de iniciación a la investigación con el trabajo desarrollado; y unas segundas a nivel de formación por las herramientas, métodos, procesos que se han utilizado para la elaboración del presente trabajo. A continuación detallo cada una de ellas.

Conclusiones Iniciación a la Investigación

En este trabajo se ha implementado un sistema de ayuda a la decisión para el tratamiento de caries en piezas dentales. Para ello se ha implementado una aplicación en Matlab capaz de segmentar imágenes de piezas dentales y de asignar, según regiones, la tipología de las secciones de la pieza dental.

El resultado del sistema ha sido más que favorable, llegando a alcanzar una precisión del 80% en el reconocimiento de las caries de la dentina y un 78% en la precisión en el reconocimiento de las caries del esmalte.

Conclusiones de Formación

Para el desarrollo de ese trabajo final de grado ha sido necesaria la utilización de algoritmos de procesamiento de imágenes por medio de APIs de Matlab, la aplicación práctica de conceptos de odontología en el procesamiento de imágenes y la comunicación con profesionales con falta de conocimientos en el ámbito de las ciencias de la computación.

1. Trabajar en grupo con profesionales de un sector diferente al de ciencias de la computación.
2. Suavizado, segmentación y enmascaramiento de imágenes.
3. Conceptos de odontología.
4. Ingeniería del software.

A lo largo del trabajo se ha podido comprobar que el sistema desarrollado ofrece una ayuda real a la hora de diagnosticar las caries, llegando incluso a dar un diagnóstico temprano que un especialista sin años de experiencia sería incapaz de dar.

Se ha observado también que el sistema ha servido para el aprendizaje del alumno a la hora de la detección de caries y de otros tejidos dentarios y de alrededor de las piezas dentales, por lo que podría utilizarse con fines didácticos.

Futuros Trabajos

Como propuestas de mejora se podrían señalar las siguientes:

- Realización de una extensión del sistema para la formación acelerada de odontólogos sin experiencia en la detección de caries.
- Ampliación del sistema a otras patologías bucales como la leucoplasia o la eritoplasia, para el diagnóstico anticipado o la prevención del cáncer bucal.

7. Referencias

- [1] P. N, «"ICDAS"--an international system for caries detection and assessment being developed to facilitate caries epidemiology, research and appropriate clinical management.,» *Community Dent Health*, vol. 21, nº 3, pp. 193-198, 2004.
- [2] K. Shivakumar y S. a. C. G. Prasas, «International Caries Detection and Assessment System: A new paradigm in detection of dental caries.,» *Journal of Conservative Dentistry*, nº 12, pp. 10-16, 2009.
- [3] M. Diniz, J. Rodrigues, I. Hug, C. Cordeiro Rde y A. and Lussi, «Reproducibility and accuracy of the ICDAS-II for occlusal caries detection.,» *Community Dentistry and Oral Epidemiology*, nº 37, pp. 399-404, 2009.
- [4] L. V. Lourega, D. M. Ushizima, G. D. Freitas y M. C. and D'Ornellas, «A hybrid image segmentation approach using linear and non-linear processing.,» de *Int. Symp. Vision Brain Mach*, Montevideo, Uruguay, 2006.
- [5] M. Galushka, H. Zheng, D. Patterson y a. L. Bradley, «Case-based tissue classification for monitoring leg ulcer healing.,» *Proc. 18th IEEE Symp. Computer-Based Med. Syst*, nº 353-358, 2005.
- [6] B. P., «Acquisition of Skin Wound Images and Measurement of Wound Healing Rate and Status Using Colour Image Processing.,» *P.h.D dissertation, Univ. Reading, Reading, U.K.*, 2000.
- [7] D. Comaniciu y P. Meer, «Mean shift: A robust approach toward feature space analysis.,» *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, nº 5, p. 603-619, 2002.
- [8] Christopher M. Christoudia, Bogdan Georgesc and Peter Meer, <<Synergism in Low Level Vision>>, *Pattern Recognition, 2002. Proceedings. 16th International Conference on (Volume:4)*
- [9] R.H. Sprague y H.J. Watson., «Decision Support Systems, Putting theory into practice», 3rd Edition, Prentice-Hall International Editions, USA, 1993.
- [10] Cesar Pérez, «Matlab y sus aplicaciones en las Ciencias y la Ingeniería.,», Prentice-Hall, Madrid, 2002