



Comparación del contenido de fosfato en esmalte dental hipomineralizado y sano mediante espectroscopía Raman

Joseph Ulate Jiménez¹ , Yesenia Sayuri Marciaga Camargo¹ ,
Adrian José Gómez-Fernández¹ .

Resumen: **Introducción:** La hipomineralización molar se asocia con alteraciones en la composición mineral del esmalte dental, las cuales pueden ser evaluadas mediante espectroscopía Raman. **Objetivo:** Comparar la concentración de fosfatos entre esmalte sano y esmalte con hipomineralización, utilizando espectroscopía Raman como método de análisis. **Métodos:** Se analizaron 16 muestras dentales extraídas con lesiones compatibles con hipomineralización molar, seleccionadas según criterios de inclusión y exclusión. En cada muestra se identificaron zonas sanas y zonas hipomineralizadas, y se obtuvieron espectros Raman para determinar la intensidad del pico correspondiente al ion fosfato. **Resultados:** La intensidad espectral del ion fosfato fue consistentemente menor en las zonas hipomineralizadas en comparación con las sanas. El análisis de varianza (ANOVA) reveló diferencias estadísticamente significativas entre los grupos clínicos según el color de la lesión ($p < 0,05$). **Conclusiones:** Se observó una disminución significativa en la concentración de fosfatos en el esmalte hipomineralizado, especialmente en las lesiones de mayor severidad clínica, lo que podría estar relacionado con su mayor fragilidad y susceptibilidad a la fractura y avance de lesiones de caries.

Palabras clave: hipomineralización, espectroscopía Raman, hidroxiapatita, esmalte dental.

Comparaçãõ do conteúdo de fosfato em esmalte dentário hipomineralizado e saudável utilizando espectroscopia Raman

Resumo: **Introdução:** A hipomineralização molar está associada a alterações na composição mineral do esmalte dentário, as quais podem ser avaliadas por meio da espectroscopia Raman. **Objetivo:** Comparar a concentração de fosfatos entre esmalte saudável e esmalte com hipomineralização, utilizando a espectroscopia Raman como método de análise. **Métodos:** Foram analisadas 16 amostras dentárias extraídas com lesões compatíveis com hipomineralização molar, selecionadas de acordo com critérios de inclusão e exclusão. Em cada amostra, foram identificadas áreas saudáveis e áreas hipomineralizadas, e espectros Raman foram obtidos para determinar a intensidade do pico correspondente ao íon fosfato. **Resultados:** A intensidade espectral do íon fosfato foi consistentemente menor nas áreas hipomineralizadas em comparação com as saudáveis. A análise de variância (ANOVA) revelou diferenças estatisticamente significativas entre os grupos clínicos conforme a cor da lesão ($p < 0,05$). **Conclusões:** Observou-se uma diminuição significativa na concentração de fosfatos no esmalte hipomineralizado, especialmente nas lesões de maior gravidade clínica, o que pode estar relacionado à sua maior fragilidade e suscetibilidade à fratura e à cárie.

Palavras-chave: hipomineralização, espectroscopia Raman, hidroxiapatita, esmalte dentário.

¹Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Comparison of Phosphate Content in Hypomineralized and Sound Dental Enamel Using Raman Spectroscopy

Abstract: **Introduction:** Molar hypomineralization is associated with alterations in the mineral composition of dental enamel, which can be evaluated using Raman spectroscopy. **Objective:** To compare phosphate concentration between healthy enamel and hypomineralized enamel using Raman spectroscopy as an analytical method. **Methods:** Sixteen extracted teeth with lesions consistent with molar hypomineralization were analyzed, selected according to inclusion and exclusion criteria. In each sample, healthy and hypomineralized areas were identified, and Raman spectra were obtained to determine the intensity of the peak corresponding to the phosphate ion. **Results:** The spectral intensity of the phosphate ion was consistently lower in hypomineralized areas compared to healthy ones. Analysis of variance (ANOVA) revealed statistically significant differences among clinical groups based on lesion color ($p < 0.05$). **Conclusions:** A significant decrease in phosphate concentration was observed in hypomineralized enamel, especially in lesions with greater clinical severity, which may be related to their increased fragility and susceptibility to fracture and caries progression.

Key words: hypomineralization, Raman spectroscopy, hydroxyapatite, dental enamel.

Introducción

La hipomineralización molar-incisiva (HMI) o hipomineralización molar (HM) es un defecto cualitativo del esmalte dental caracterizado por la presencia de opacidades bien delimitadas en molares e incisivos permanentes principalmente, así como en otros órganos dentarios tanto permanentes como primarios. La afectación simultánea de ambos tipos de dientes representa la forma más severa del trastorno; sin embargo, si solo se observan opacidades en los incisivos sin involucrar uno o más de los primeros molares, no se considera como HM propiamente dicha^{1,2}.

Actualmente, la HM se describe como un defecto de origen sistémico y etiología multifactorial, que compromete de uno a cuatro primeros molares permanentes. Esta alteración se asocia con una modificación en la disposición de los cristales de hidroxiapatita, atribuida a una mayor retención de proteínas como

la albúmina sérica y el colágeno tipo I, lo que interfiere en el proceso normal de mineralización durante la fase de maduración del esmalte^{3,4}. Clínicamente, el esmalte afectado presenta opacidades de color blanco, crema, amarillo o marrón, y en casos severos puede observarse fractura post-eruptiva del esmalte.

La severidad clínica de la HM es variable, pudiendo ir desde lesiones leves hasta casos complejos con fractura del esmalte, dolor, restauraciones atípicas y desarrollo acelerado de caries dental. Estas alteraciones comprometen significativamente la estructura coronaria^{2,5}. A nivel histoquímico, el esmalte con HM presenta una densidad mineral hasta un 19% menor que el esmalte sano, con disminución en los niveles de calcio y fósforo, y un contenido proteico hasta 21 veces mayor⁶.

Este tipo de defecto se ha vuelto cada vez más común en la práctica clínica, representando un desafío particular

para el odontopediatra, ya que las manifestaciones se presentan desde edades tempranas². Su prevalencia global varía ampliamente, entre 2.4% y 40.2%, tanto en dentición permanente como decidua⁷.

Recientes investigaciones han identificado hasta cinco fenotipos distintos de hipomineralización, y se ha propuesto un nuevo término: hipomineralización de otros dientes permanentes (HOPT), el cual incluye premolares y posiblemente comparte etiología con la HM y la HMI^{8,9}. A pesar de más de dos décadas de estudio, la etiología exacta de la HM aún no se comprende completamente, lo que refuerza su consideración como un problema de salud pública y justifica la necesidad de investigaciones continuas en torno a sus factores de riesgo, impacto en la calidad de vida y abordaje clínico¹⁰.

En este contexto, la espectroscopía Raman ha emergido como una técnica no destructiva altamente eficaz para el análisis de tejidos biológicos, incluido el esmalte dental. Esta técnica vibracional permite obtener información estructural y química precisa, actuando como una “huella digital molecular” para la identificación de compuestos orgánicos e inorgánicos¹¹. Diversos estudios han empleado espectroscopía Raman para investigar defectos estructurales en esmalte afectado por HM, analizando su contenido mineral, en particular la concentración del ion fosfato (ν_1), componente clave de la hidroxiapatita¹²⁻¹⁵.

Los hallazgos indican que el contenido inorgánico de fosfatos en dientes con

HM es significativamente menor en comparación con esmalte sano, lo que influye en la respuesta al grabado ácido y en la adhesión de materiales restauradores. Esta menor mineralización se asocia con mayor contenido proteico y desorganización de los cristales de hidroxiapatita, lo que compromete la integridad estructural del tejido¹⁶.

En este estudio se analizó la concentración de fosfatos en esmalte dental sano y en esmalte hipomineralizado con distintas manifestaciones clínicas (blanco, crema, amarillo y marrón), mediante espectroscopía Raman. El objetivo fue comparar el contenido del ion fosfato entre ambas condiciones y evaluar las diferencias según el color clínico de las lesiones.

Materiales y métodos

Este estudio experimental *in vitro* se llevó a cabo en el Laboratorio de Investigación del Posgrado en Odontología de la Universidad de Costa Rica (UCR). Al tratarse de una investigación que utilizó dientes extraídos y clasificados como desechos anatopatológicos, no fue necesario someter el proyecto a evaluación por parte del Comité Ético Científico (CEC) de la UCR.

La muestra estuvo conformada por 16 dientes permanentes humanos extraídos, recolectados en las clínicas dentales de la Facultad de Odontología. Todos los pacientes adultos, padres o encargados legales firmaron un consentimiento informado previo a los tratamientos, permitiendo el uso posterior de los

dientes extraídos para fines docentes o de investigación. Los dientes seleccionados no contenían información identificable, y su extracción no estuvo relacionada con esta investigación.

Criterio de inclusión

- Dientes unirradiculares o multirradiculares con diagnóstico clínico de hipomineralización molar (HM).
- Superficies coronales con opacidades demarcadas de color blanco, crema, amarillo o marrón, o con fractura post-eruptiva.
- Piezas dentales permanentes con restauraciones atípicas que preserven zonas hipomineralizadas.
- Lesiones localizadas en el tercio medio o en cúspides oclusales.
- Presencia de fracturas post-eruptivas acompañadas de opacidades.
- Piezas dentales destruidas que aún conserven áreas hipomineralizadas.
- Dientes conservados adecuadamente para su análisis.

Criterio de exclusión

- Dientes fracturados sin presencia de hipomineralización.
- Restauraciones atípicas que no involucren zonas hipomineralizadas.
- Lesiones cariosas cavitadas sin bordes de esmalte hipomineralizado.
- Defectos de esmalte asociados a otras etiologías distintas de la HM.

Se seleccionaron 16 órganos dentarios que cumplieron los criterios, y se excluyeron 6 muestras por presentar diagnóstico diferente a HM, como fluorosis, restauraciones sin áreas de HM o caries cavitadas. Las muestras fueron limpiadas con cepillo, agua y cavitron ultrasónico, y luego almacenadas en frascos de vidrio con agua destilada a 20 °C hasta su análisis. Cada molar se clasificó según el color clínico de la lesión en tres categorías, siguiendo los criterios de la Academia Europea de Odontología Pediátrica (EAPD):

- Blanco/crema
- Amarillo/marrón
- Fractura del esmalte con lesión de HM

Análisis espectroscópico

Adquisición del espectro Raman

El análisis se realizó utilizando un microscopio confocal Raman (WiTec, modelo PRO-L7A2S-10; Figura 1), equipado con un láser de 785 nm y potencia de 100 mW. El tamaño del punto de medición fue de aproximadamente 1–2 μm , con lente de 40x. Cada espectro fue obtenido con un tiempo de integración de 0,5 segundos por escaneo.

Antes de la medición, el equipo fue calibrado, y las muestras secadas para evitar interferencia por fluorescencia del agua (dispersión Rayleigh). Cada diente fue fijado con cera en un portamuestras.

Se realizaron mediciones tanto en la zona hipomineralizada como en una zona sana del mismo diente, que funcionó como control interno. Las condiciones ambientales se mantuvieron a 26 °C.



Figura 1. Microscopio confocal Raman (marca: WiTec, modelo: PRO-L7A2S-10).

Preprocesamiento de datos

Los datos espectrales fueron visualizados y procesados mediante el software Spectragryph® v1.2.16 (Dr. Friedrich Menges), el cual permite obtener los valores de energía (eje x), intensidad (eje y) y el área bajo la curva de los picos espectrales. Los ajustes aplicados incluyeron línea base, suavizado, y eliminación de puntos atípicos (Figura 2).

Se identificaron los picos de fosfato ν_1 (PO_4^{3-}), característicos del componente mineral inorgánico (hidroxiapatita), principalmente en la región espectral de 958 a 960 cm^{-1} . Para evaluar la cristalinidad del esmalte, se calculó la razón $960/1070 \text{ cm}^{-1}$.

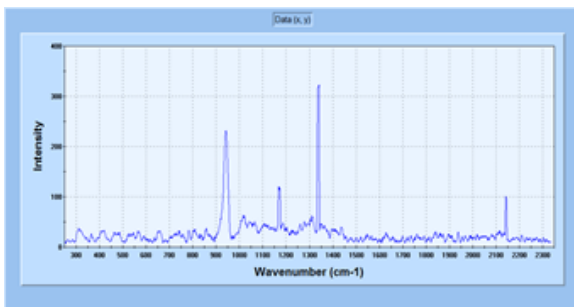


Figura 2. Espectro obtenido de una muestra.

Análisis estadístico

Los datos fueron tabulados en Excel y analizados con el software SPSS v28.0. Previo a la aplicación de pruebas

inferenciales, se verificó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk.

- Para comparar los valores de fosfato entre esmalte sano e hipomineralizado, se utilizó la prueba t de Student para muestras relacionadas.
- Para comparar las concentraciones de fosfato según el color clínico de la lesión, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor.

En todos los casos, se adoptó un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Si los supuestos de normalidad no se cumplían, se consideró realizar análisis no paramétricos.

Resultados

Se analizaron un total de 16 muestras dentales permanentes que cumplían con los criterios de inclusión. Se excluyeron seis piezas por presentar fluorosis, caries cavitadas o restauraciones sin zonas hipomineralizadas. La evaluación se realizó mediante espectroscopía Raman, enfocándose en la intensidad del pico espectral del ion fosfato ν_1 (PO_4^{3-}), como indicador del contenido mineral del esmalte dental.

Comparación entre esmalte sano e hipomineralizado

Cada diente fue evaluado en dos zonas: una clínica, visualmente sana (esmalte control) y otra con evidencia de hipomineralización. Los resultados de la intensidad espectral promedio del ion fosfato para cada muestra se presentan en el Cuadro 1.

En términos generales, la intensidad espectral promedio del ion fosfato en el esmalte sano fue de 113.98 cm^{-1} , mientras que en las zonas hipomineralizadas disminuyó a 44.44 cm^{-1} , lo que representa una reducción promedio del 61% en la señal asociada al contenido mineral.

Esta disminución es coherente con la pérdida de mineral observada clínicamente en lesiones hipomineralizadas y se visualiza con claridad en la Figura 3, donde la mayoría de las muestras presentan una reducción notable en la señal espectral correspondiente al ion fosfato en las zonas afectadas.

Para determinar la significancia estadística de esta diferencia, se aplicó la prueba t de Student para muestras relacionadas, que arrojó una diferencia media de $69,53 \text{ cm}^{-1}$ con un valor de $p = 0,10$. Aunque este resultado no alcanza el umbral de significancia estadística convencional ($\alpha = 0,05$), la magnitud del cambio

Cuadro 1. Intensidad espectral promedio (cm^{-1}) del ion fosfato en esmalte sano e hipomineralizado.

Muestra	Esmalte sano	Esmalte hipomineralizado
1	78,42	64,34
2	42,14	33,40
4	52,73	41,85
5	242,30	39,07
6	103,00	85,43
7	61,22	22,22
8	147,80	59,26
9	70,41	69,32
11	98,68	33,59
12	412,10	79,27
13	87,82	18,83
15	50,09	46,45
16	58,71	24,43
20	230,60	34,09
21	35,83	26,03
22	51,87	33,56

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos por espectroscopía Raman.

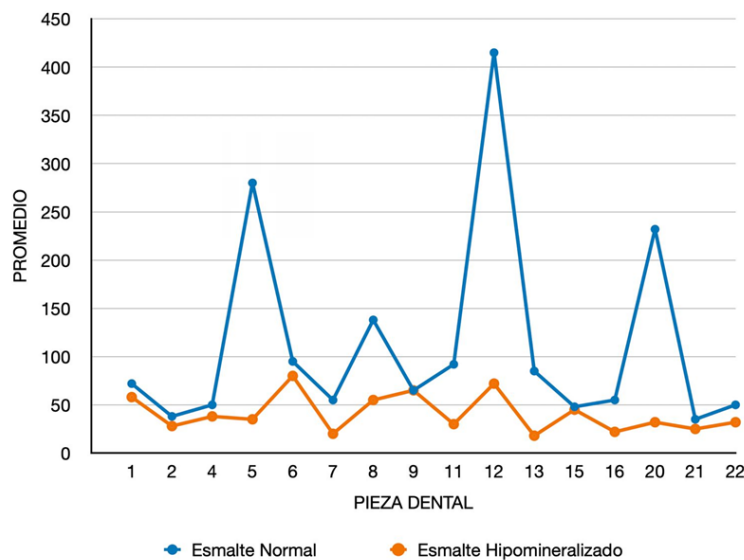


Figura 3. Intensidad espectral promedio de fosfatos en esmalte sano e hipomineralizado por muestra dental.

observado indica una tendencia clínica relevante. Esta observación refuerza la necesidad de estudios posteriores con tamaños muestrales mayores para validar estos hallazgos y explorar su implicación diagnóstica y terapéutica en la práctica clínica.

Comparación según el color clínico del esmalte hipomineralizado

Las zonas de esmalte hipomineralizado se clasificaron en tres categorías clínicas, basadas en el aspecto visual del defecto: blanco-crema, amarillo-marrón y marrón con pérdida estructural. Para cada grupo se calculó el porcentaje promedio de reducción en la intensidad espectral del ion fosfato (v1), en comparación con las zonas de esmalte sano correspondientes. Los resultados se presentan en el Cuadro 2.

Estos resultados sugieren una relación directa entre la severidad clínica del defecto y la magnitud de la pérdida mineral, siendo mayor en las lesiones más oscuras o con pérdida estructural. Esta tendencia

Cuadro 2. Porcentaje promedio de reducción de fosfatos según el color clínico del esmalte hipomineralizado.

Grupo clínico	Reducción promedio (%)
Marrón con pérdida estructural	85%
Amarillo-marrón	81%
Blanco-crema	66%

se visualiza claramente en la Figura 4, donde, en cada muestra estudiada, se observa que el porcentaje de reducción de fosfatos aumenta conforme se incrementa la severidad del defecto clínico.

Para evaluar si estas diferencias eran estadísticamente significativas, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), cuyos resultados se resumen en el Cuadro 3.

El análisis mostró que las diferencias entre las categorías clínicas fueron

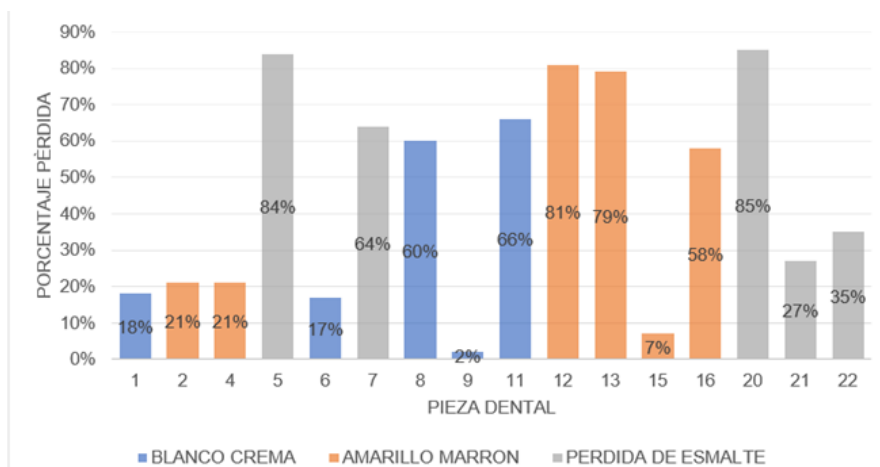


Figura 4. Intensidad espectral promedio de fosfatos en esmalte sano e hipomineralizado por muestra dental.

Cuadro 3. Resultados del análisis ANOVA de intensidad espectral entre grupos de color clínico en esmalte normal e hipomineralizado

Grupo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	p (Sig.)
Normal	1628.91	2	814.46	0.07	0.933
Hipomineralizado	2598.33	2	1299.16	4.31	0.037*

* $p < 0,05$ indica diferencia estadísticamente significativa.

estadísticamente significativas únicamente en las zonas de esmalte hipomineralizado ($p = 0,037$), mientras que en el esmalte sano no se encontraron diferencias relevantes ($p = 0,933$).

Comparaciones específicas entre grupos clínicos

Para explorar con mayor profundidad la relación entre el color clínico del esmalte hipomineralizado y su contenido mineral,

Cuadro 4. Comparación de intensidad espectral entre esmalte blanco crema y amarillo-marrón

Grupo	Media	Desviación estándar	N
Normal - Blanco crema	99,66	30,15	5
Normal - Amarillo marrón	117,27	145,29	6
Hipomineralizado - Blanco crema	62,39	18,65	6
Hipomineralizado - Amarillo marrón	40,71	21,53	6

Cuadro 5. Comparación de intensidad espectral entre esmalte blanco crema y esmalte con pérdida estructural.

Grupo	Media	Desviación estándar	N
Normal - Blanco crema	94,63	30,15	5
Normal - Pérdida de esmalte	124,36	102,8	5
Hipomineralizado - Blanco crema	62,39	18,65	5
Hipomineralizado - Pérdida de esmalte	30,99	6,76	5

Cuadro 6. Comparación de intensidad espectral entre esmalte amarillo-marrón y esmalte con pérdida estructural.

Grupo	Media	Desviación estándar	N
Normal - Amarillo marrón	117,27	145,29	6
Normal - Pérdida de esmalte	124,36	102,8	5
Hipomineralizado - Amarillo marrón	40,71	21,53	5
Hipomineralizado - Pérdida de esmalte	30,99	6,76	5

se realizaron comparaciones por pares entre los tres grupos clínicos definidos: blanco-crema, amarillo-marrón y pérdida estructural. En cada caso, se contrastaron las intensidades espectrales del ion fosfato tanto en zonas sanas como en zonas hipomineralizadas.

Los resultados evidencian que, en las zonas hipomineralizadas, la intensidad espectral del ion fosfato disminuye progresivamente con la severidad clínica del defecto. Mientras que el esmalte blanco-crema presenta niveles intermedios de fosfato, las zonas amarillo-marrón exhiben una reducción más acentuada, y las zonas con pérdida estructural muestran los valores más bajos registrados. Esta gradación se mantiene incluso cuando se compara con las zonas sanas correspondientes.

Síntesis de los resultados

Los hallazgos de este estudio confirman que el contenido mineral del esmalte, medido mediante la intensidad espectral del ion fosfato v1, es significativamente menor en las zonas hipomineralizadas que en el esmalte sano. La diferencia global, aunque no significativa desde el punto de vista estadístico ($p = 0,10$), mostró una reducción promedio del 61%, lo

cual podría tener una implicación clínica relevante, particularmente en términos de diagnóstico, manejo preventivo y selección de materiales restauradores.

El análisis por subgrupos clínicos del esmalte hipomineralizado reveló diferencias estadísticamente significativas en la intensidad espectral del fosfato ($p = 0,037$), lo que sugiere que el color clínico observable puede reflejar con cierto grado de fiabilidad el grado de hipomineralización subyacente.

Las comparaciones por pares fortalecen esta hipótesis, mostrando que las lesiones de color marrón con pérdida estructural son las más severamente desmineralizadas, seguidas de las lesiones amarillo-marrón y por último las blanco-crema.

Discusión

El componente mineral predominante del esmalte dental es la hidroxiapatita $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$, cuya fase inorgánica está dominada por iones fosfato. En este estudio, la espectroscopía Raman se utilizó como herramienta para cuantificar la intensidad del pico espectral v1 del ion fosfato

(alrededor de 960 cm^{-1}), como indicador del grado de mineralización del esmalte. Los resultados demostraron que el contenido de fosfatos en el esmalte hipomineralizado (HM) es significativamente inferior al del esmalte sano, lo que respalda hallazgos previos sobre la alteración estructural de este tejido ¹⁶.

De manera general, se observó una reducción promedio del 61 % en la señal de fosfato en las zonas hipomineralizadas, con diferencias más marcadas en lesiones clínicamente más severas, especialmente en aquellas clasificadas como marrón con pérdida estructural. Esta tendencia coincide con lo reportado por Fraser et al., quienes identificaron una relación entre la severidad del color clínico y el grado de afectación del esmalte ¹⁵, así como por Cerdas et al., quienes documentaron mayor afectación estructural en lesiones de color marrón en dientes permanentes con HM ¹⁷.

Estudios previos han descrito que el esmalte HM se caracteriza por una estructura más porosa, una retención anormal de proteínas (como albúmina y colágeno tipo I), y una organización prismática irregular ^{18,19}. Estas alteraciones microestructurales explican su menor resistencia mecánica y su mayor susceptibilidad a fracturas posteriores a la erupción. Asimismo, nuestra investigación evidenció que las lesiones de color marrón con pérdida estructural presentaron la menor concentración de fosfatos, seguidas por las lesiones amarillo-marrón y blanco-crema, lo cual fue estadísticamente significativo en el análisis ANOVA ($p = 0,037$). Esto respalda la hipótesis de que el color clínico puede servir como indicador de la calidad estructural del esmalte.

Desde el punto de vista clínico, esta disminución en el contenido de fosfatos tiene implicaciones importantes. La menor mineralización y el aumento en porosidad afectan negativamente la respuesta del esmalte HM al grabado ácido y a la adhesión de materiales restauradores ^{20,21}. Estudios recientes han documentado tasas más bajas de éxito clínico en restauraciones adhesivas sobre esmalte hipomineralizado, especialmente cuando no se emplean sistemas adhesivos optimizados o técnicas de infiltración específicas ²³⁻²⁵.

El presente estudio contribuye al conocimiento de la composición química del esmalte HM mediante una técnica no destructiva como la espectroscopía Raman. Esta herramienta permite analizar los tejidos sin alterar su estructura, como también lo destacan Gonzales-Solis et al. y Zepeda-Zepeda et al., quienes validaron su utilidad para diagnosticar defectos del esmalte como la fluorosis ^{26,27}. Además, Raman ha demostrado ser una técnica eficaz para analizar la estructura química en el límite amelodentinario y caracterizar la cristalización del esmalte ²⁸.

El bajo contenido de fosfatos observado en el esmalte HM se asocia con una mayor presencia de proteínas retenidas, como carbonatos y albúmina, lo cual ha sido señalado como un factor que facilita la colonización bacteriana y la progresión de caries ^{18,19,29}. Esto refuerza la importancia de identificar precozmente las lesiones de HM para establecer protocolos de prevención más eficaces, particularmente en niños con riesgo elevado.

El análisis espectral realizado mostró, en concordancia con la literatura, que

el pico ν_1 del ion fosfato alrededor de 960 cm^{-1} se correlaciona directamente con la concentración de cristales de hidroxiapatita¹⁴. Esta relación permite diferenciar entre esmalte sano y afectado, e incluso discriminar entre distintos grados de afectación según el color clínico, lo que representa una oportunidad para el desarrollo de métodos diagnósticos más precisos y no invasivos.

Actualmente, existe escasa literatura en América Latina que documente en profundidad la composición mineral del esmalte HM y su implicación clínica. Investigaciones como la de Natarajan et al. (2015)³⁰ evidencian el potencial de esta línea de estudio, pero aún son necesarios más trabajos que exploren estas características en diferentes poblaciones y condiciones clínicas.

Este estudio respalda la utilidad clínica de la espectroscopía Raman como herramienta para caracterizar la hipomineralización del esmalte dental. Los hallazgos obtenidos motivan la realización de investigaciones futuras con muestras más amplias, que permitan validar la relación entre el aspecto clínico de las lesiones, su composición química y el desempeño restaurador. Profundizar en el conocimiento de las limitaciones estructurales del esmalte hipomineralizado puede abrir nuevas oportunidades para el desarrollo de materiales y técnicas adaptadas a estos defectos, con el objetivo final de mejorar la calidad de vida de los pacientes afectados.

Es importante reconocer las limitaciones metodológicas de este estudio, particularmente el tamaño muestral ($n = 16$), lo que pudo haber contribuido a

que la diferencia global en la concentración de fosfatos (61% de reducción) no alcanzara significancia estadística. Al ser una investigación in vitro, los resultados reflejan la composición química estática del esmalte extraído y no consideran la complejidad dinámica del entorno oral, como la influencia salival o la progresión del defecto in vivo. Futuras investigaciones deberían incluir muestras más amplias para validar estos hallazgos y complementar el análisis con pruebas mecánicas directas (microdureza), para correlacionar cuantitativamente la disminución de fosfatos con la fragilidad clínica inferida.

Conclusiones

Este estudio evidenció, mediante espectroscopía Raman, una disminución significativa en la concentración de fosfatos en el esmalte hipomineralizado en comparación con el esmalte sano. La reducción fue más marcada en las lesiones clínicamente más severas, particularmente en aquellas de color marrón con pérdida estructural, mientras que las lesiones blanco-crema mostraron alteraciones minerales menos pronunciadas. Estos resultados sugieren que el color clínico puede ser un indicador del grado de desmineralización y, por ende, de la fragilidad del esmalte.

La espectroscopía Raman demostró ser una herramienta útil, no invasiva y precisa para el análisis químico del esmalte, lo que abre nuevas posibilidades para su aplicación tanto en la clínica como en la investigación. Finalmente, los hallazgos refuerzan la necesidad de desarrollar

protocolos restauradores específicos para el manejo del esmalte hipomineralizado, considerando sus particularidades estructurales y su comportamiento clínico diferenciado.

Conflictos de Intereses y Financiación

No existe ningún conflicto de interés ni financiación que involucre los resultados expuestos en la presente investigación.

Referencias

1. Weerheijm KL, Jälevik B, Alaluusua S. Molar-incisor hypomineralisation. *Caries Res.* 2001;35(5):390–391.
2. Ghanim A, Silva MJ, Elfrink ME, Lygidakis NA, Mariño R, Weerheijm KL, Manton DJ. Molar incisor hypomineralisation (MIH) training manual for clinical field surveys and practice. *Eur Arch Paediatr Dent.* 2017;18(4):225–242.
3. Farah RA, Monk BC, Swain MV, Drummond BK. Protein content of molar–incisor hypomineralisation enamel. *J Dent.* 2010;38(7):591–596.
4. Mahoney EK, Rohanizadeh R. Crystallite size of dental enamel affected by molar–incisor hypomineralisation (MIH). *J Dent Res.* 2012;91(Spec Iss A):3402.
5. Guzmán G, Aguilera FS, Velásquez LM, et al. Aplicación de espectroscopía Raman para el análisis de defectos del esmalte. *Rev Mex Cienc Odontol.* 2020;9(3):123–130.
6. Mangum JE, Crombie FA, Kilpatrick N, Manton DJ, Hubbard MJ. Surface integrity governs the proteome of hypomineralized enamel. *J Dent Res.* 2010;89(10):1160–1165.
7. Zhao D, Dong B, Yu D, Ren Q, Sun Y. The prevalence of molar incisor hypomineralization: Evidence from 70 studies. *Int J Paediatr Dent.* 2018;28(2):170–179.
8. Ghanim A, Morgan M, Marino R, Bailey D, Manton D. Risk factors of hypomineralised second primary molars. *J Dent.* 2013;41(7):546–552.
9. Jeremias F, Koruyucu M, Küchler EC, et al. Genes expressed in dental enamel development are associated with molar-incisor hypomineralization. *Arch Oral Biol.* 2013;58(10):1434–1442.
10. Fagrell TG, Ludvigsson J, Ullbro C, Lundin SA, Koch G. Aetiology of molar-incisor hypomineralizations: a systematic review. *Eur Arch Paediatr Dent.* 2011;12(2):53–58.
11. Deliormanlı AM. Raman spectroscopy for biomedical applications. In: Akyıldız FT, Ed. *Spectroscopy in Life Sciences.* IntechOpen; 2020.
12. Zhang H, Darvell BW. Morphology and structure of tooth enamel. *Biomaterials.* 2010;31(20):5238–5244.
13. Liu X, Wang Y. Raman spectroscopy study of enamel demineralization and remineralization. *J Dent.* 2010;38(9):732–739.
14. Cury JA, Tenuta LMA. Enamel remineralization: controlling the caries disease or treating early caries lesions? *Braz Oral Res.* 2009;23(Suppl 1):23–30.
15. Fraser D, Deery C, Fung DE, et al. Managing molar incisor hypomineralisation: a survey of UK general dental practitioners. *Br Dent J.* 2012;213(8):E12.
16. Crombie FA, Manton DJ, Palamara JE, Zaluzniak I, Cochrane NJ, Reynolds EC. Characterisation of developmentally hypomineralised human enamel. *J Dent.* 2013;41(7):611–618.
17. Cerdas-Ureña, K., & Gómez-Fernández, A. (2020). Relación entre el color clínico de opacidades y la pérdida de estructura dental en primeros molares permanentes con hipomineralización molar incisiva. *Odontos,* 22(36), 54–66. <https://doi.org/10.15517/odontos.v22i36.40975>
18. Elfrink ME, ten Cate JM, Jaddoe VW, Hofman A, Moll HA, Veerkamp JS. Deciduous molar hypomineralisation and molar incisor hypomineralisation. *J Dent Res.* 2012;91(6):551–555.
19. Hubbard MJ, Mangum JE, Perez VA, Nervo GJ, Hall RK. Molar Hypomineralisation: A Call to Arms for Enamel Researchers. *Front Physiol.* 2017;8:546. Published 2017 Aug 3. doi:10.3389/fphys.2017.00546
20. William V, Messer LB, Burrow MF. Molar incisor hypomineralization: review and recommendations for clinical management. *Pediatr Dent.* 2006;28(3):224–232.
21. Fragelli CM, Jeremias F, Feltrin J, et al. Longitudinal evaluation of the structural integrity of dental enamel in children with molar incisor hypomineralisation: a prospective study. *Int J Paediatr Dent.* 2015;25(4):303–308.
22. Gutiérrez-Salazar MP, Acosta-Gío AE. Spectroscopic study of the inorganic composition of dental enamel affected by MIH. *J Mater Sci Mater Med.* 2011;22(2):347–352.

23. Weber KR, Wierichs RJ, Meyer-Lueckel H, Flury S. Restoration of teeth affected by molar-incisor hypomineralisation: a systematic review. *Swiss Dent J.* 2021;131(12):988-997. doi:10.61872/sdj-2021-12-764
24. Denis R, Marty M, Esclassan R, Noirrit-Esclassan E, Canceill T. Description and Durability of the Various Direct Restoration Techniques in Molar-Incisor Hypomineralization: A Systematic Review. *Eur J Prosthodont Restor Dent.* 2025;33(1):113-122. Published 2025 Feb 28. doi:10.1922/EJPRD_2760Denis10
25. de Souza JF, Fragelli CB, Jeremias F, Paschoal MAB, Santos-Pinto L, de Cássia Loiola Cordeiro R. Eighteen-month clinical performance of composite resin restorations with two different adhesive systems for molars affected by molar incisor hypomineralization. *Clin Oral Investig.* 2017;21(5):1725-1733. doi:10.1007/s00784-016-1968-z
26. Zepeda-Zepeda MA, Picquart M, Irigoyen-Camacho ME, Mejía-Gómez AM. Diagnosis of Dental Fluorosis Using Micro-Raman Spectroscopy Applying a Principal Component-Linear Discriminant Analysis. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(20):10572. Published 2021 Oct 9. doi:10.3390/ijerph182010572
27. González-Solís JL, Martínez-Cano E, Magaña-López Y. Early detection of dental fluorosis using Raman spectroscopy and principal component analysis. *Lasers Med Sci.* 2015;30(6):1675-1681. doi:10.1007/s10103-014-1638-9
28. Xu C, Yao X, Walker MP, Wang Y. Chemical/molecular structure of the dentin-enamel junction is dependent on the intratooth location. *Calcif Tissue Int.* 2009;84(3):221-228. doi:10.1007/s00223-008-9212-8
29. Inchingolo AM, Inchingolo AD, Viapiano F, et al. Treatment Approaches to Molar Incisor Hypomineralization: A Systematic Review. *J Clin Med.* 2023;12(22):7194. Published 2023 Nov 20. doi:10.3390/jcm12227194
30. Natarajan AK, Fraser SJ, Swain MV, Drummond BK, Gordon KC. Raman spectroscopic characterisation of resin-infiltrated hypomineralised enamel. *Anal Bioanal Chem.* 2015;407(19):5661-5671. doi:10.1007/s00216-015-8742-y

Recibido 27/10/23

Aceptado 15/12/25

Correspondencia: Joseph Ulate Jiménez, correo: joseph.ulate@ucr.ac.cr