



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2024,
Volumen 8, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4

ENFOQUES DIAGNÓSTICOS NO INVASIVOS EN EL SÍNDROME COMPARTIMENTAL. REVISIÓN DE LA LITERATURA

**NONINVASIVE DIAGNOSTIC APPROACHES IN
COMPARTMENT SYNDROME. LITERATURE REVIEW**

Md. José Andrés Trelles Guarnizo

Centro de Salud de Malacatos, Ecuador

Md. Anais Elizabeth Mancheno Romero

Investigador Independiente, Ecuador

Md. Byron Fabián Pinos Reyes

Distrito 14D06 – Salud, Ecuador

Md. Estefania Mayorie Vaca Guaytarilla

Investigadora Independiente, Ecuador

Md. Jacqueline Liliana Avila Clavijo

Investigadora Independiente, Ecuador

Md. Andrea Lizbeth Flores Ledesma

Investigadora Independiente, Ecuador

Enfoques Diagnósticos no Invasivos en el Síndrome Compartimental Revisión de la Literatura

Md. José Andrés Trelles Guarnizo¹
trellesandres@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6767-6847>
Centro de Salud de Malacatos
Loja, Ecuador

Md. Anais Elizabeth Mancheno Romero
elizabeth_17.09@hotmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-4950-7059>
Investigador Independiente
Machala, Ecuador

Md. Byron Fabián Pinos Reyes
byrin.fpr95@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-8217-5126>
Distrito 14D06 - Salud
Morona Santiago, Ecuador

Md. Estefania Mayorie Vaca Guaytarilla
estefy7723@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-8100-9131>
Investigadora Independiente
Quito, Ecuador

Md. Jacqueline Liliana Avila Clavijo
jakilili55@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-5821-7704>
Investigadora Independiente
Cuenca, Ecuador

Md. Andrea Lizbeth Flores Ledesma
andlizflores@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-7216-5376>
Investigadora Independiente
Machala, Ecuador

RESUMEN

El síndrome compartimental es considerado como una emergencia quirúrgica ortopédica resultante de una lesión física se produce existe un aumento de presión excesiva dentro de un compartimento muscular llevando a un cuadro de isquemia el cual si es prolongado se convierte en irreversible. La medición directa de la presión compartimental sigue siendo crucial. No está establecido un diagnóstico cien por ciento certero para esta patología debido a esto se estudia espectroscopia de infrarrojo cercana y los métodos de ultrasonido, como la elastografía por deformación y el bucle de bloqueo de fase pulsado. La mayoría de los casos diagnosticados con este síndrome se presentan en las extremidades las cuales son sometidas al procedimiento de la fasciotomía, un método que se lleva a cabo para descomprimir el miembro afectado, normalizar la presión intercompartimental y reducir la disfunción neuromuscular.

Palabras clave: síndrome compartimental, diagnóstico, elastografía, ultrasonido

¹ Autor principal
Correspondencia: trellesandres@gmail.com

Noninvasive Diagnostic Approaches in Compartment Syndrome Literature Review

ABSTRACT

Compartment syndrome is considered an orthopedic surgical emergency resulting from a physical injury that causes excessive pressure to build up within a muscle compartment, leading to ischemia, which if prolonged becomes irreversible. Direct measurement of compartment pressure remains crucial. A 100% accurate diagnosis for this pathology has not been established, and therefore near-infrared spectroscopy and ultrasound methods such as strain elastography and pulsed phase-locked loop are studied. Most cases diagnosed with this syndrome occur in the extremities, which are subjected to the fasciotomy procedure, a method performed to decompress the affected limb, normalize intercompartmental pressure, and reduce neuromuscular dysfunction.

Keywords: compartment syndrome, diagnosis, elastography, ultrasound

Artículo recibido 15 julio 2024

Aceptado para publicación: 20 agosto 2024



INTRODUCCIÓN

El síndrome compartimental es una entidad clínica resultante de una lesión física que conlleva a manifestaciones clínicas severas sino tiene un diagnóstico oportuno; considerada como una emergencia quirúrgica ortopédica (Acuña, Orozco, & Chacón, 2022; Arroyo, Solano, & Rojas, 2018). Se presenta con mayor frecuencia en jóvenes del sexo masculino y tiene una incidencia anual de 3.1 por cada 100.000 personas (Pablo-Márquez et al., 2014).

Este síndrome cursa con manifestaciones clínicas que se presentan de 4 a 6 horas después de las lesiones denominadas las seis P, por sus siglas en inglés los cuales son: parestesias, dolor, presión, palidez, parálisis, ausencia de pulso (Falcón et al., 2009).

El síndrome se presenta cuando existe un aumento de presión excesiva dentro de un compartimento muscular lo que disminuye la adecuada perfusión capilar a los músculos, nervios y tejidos blandos, comprometiendo la viabilidad y llegando a dañar las estructuras provocando un estado de isquemia el cual si es prolongado se convierte en irreversible (Olán et al., 2023).

A pesar de que se puede presentar en cualquier región de cuerpo la mitad de los casos reportados se da en las extremidades, asociadas a fracturas (Pablo-Márquez et al., 2014). Las extremidades sufren el proceso de la fasciotomía, un método que se lleva a cabo para descomprimir el miembro afectado, normalizar la presión intercompartimental y reducir la disfunción neuromuscular (Jäger & Zeichena, 2012).

No está establecido un diagnóstico cien por ciento certero para esta patología por lo que se presentan varios métodos diagnósticos sin embargo debido a la existencia ya de una lesión instaurada se prefiere los diagnósticos no invasivos (Arroyo, Solano, & Rojas, 2018). Por lo que es un reto para el equipo de salud realizar este diagnóstico antes de que exista lesión muscular o nerviosa irreversible (Falcón et al., 2009).

Debido a esto se realiza esta investigación que tiene como objetivo el reconocimiento de los métodos diagnósticos no invasivos para el diagnóstico precoz del síndrome compartimental.

METODOLOGÍA

Se realizó búsqueda en Pubmed, Web Of Science, Cochrane con los términos indexados en español: “técnicas”, “estrategias”, “diagnóstico”, “no invasivo” y “síndrome compartimental”, junto a sus

términos indexados en inglés: “techniques”, “strategies”, “diagnosis”, “noninvasive” y “compartment syndrome”. Se seleccionan los artículos relacionados a los enfoques diagnósticos no invasivos en el síndrome compartimental.

RESULTADOS

Actualmente, el diagnóstico del síndrome compartimental se basa principalmente en los síntomas clínicos, lo que requiere la cooperación del paciente. El único método objetivo disponible para la detección del síndrome compartimental es la medición directa de la presión intracraneal. Sin embargo, los médicos suelen recurrir a esta medición solo cuando los síntomas son ambiguos o como una prueba complementaria para confirmar el diagnóstico (Ulmer, 2002). Un método de medición cuantificable y objetivo para detectar las etapas iniciales de la enfermedad sería especialmente útil en el diagnóstico de pacientes en estado de shock, inconscientes, ancianos o demasiado jóvenes para comunicarse (Schmidt, 2017).

Signos clínicos del síndrome compartimental

El síndrome compartimental se manifiesta clínicamente a través de varios síntomas. Clásicamente, se considera que las “cinco P” (dolor, palidez, ausencia de pulso, parálisis y parestesia) son los indicadores iniciales de esta condición (Donaldson, Haddad, & Khan, 2014). La hinchazón y la tensión palpable sobre un compartimento muscular son los primeros signos de un síndrome compartimental y reflejan un aumento de la presión dentro del compartimento. Sin embargo, estos signos son solo indicaciones generales del incremento de la presión intramuscular y deben complementarse con la búsqueda de otros hallazgos físicos (Mubarak et al. , 1978).

El dolor, a menudo descrito como ardiente y profundo, se intensifica con el estiramiento pasivo de los músculos del compartimento. La falta de pulso y la parálisis son poco comunes, ocurriendo solo después de una lesión arterial o tras un periodo prolongado de tiempo (Whitesides & Heckman, 1996). Los signos físicos suelen ser escasos, pero puede haber una sensación firme y dura al palpar profundamente. En las etapas iniciales, puede observarse una disminución de la discriminación de dos puntos o una reducción en la sensación de vibración. Si se presenta un déficit sensorial significativo, el síndrome ya está en una fase avanzada (Donaldson, Haddad, & Khan, 2014).

Así, al combinar la palpación con la búsqueda de varios de estos signos clínicos, se puede lograr una alta especificidad pero una baja sensibilidad en el diagnóstico. Además, la cooperación del paciente es esencial para establecer el diagnóstico. El dolor puede aliviarse mediante el bloqueo de los nervios periféricos, lo cual se utiliza en casos de traumatismos ortopédicos, pero también puede enmascarar la presencia del síndrome compartimental (Tran et al., 2020).

Medición cuantitativa de la dureza del tejido

Cuando se produce un síndrome compartimental, los tejidos del compartimento afectado se expanden y la presión intramuscular (IMP) aumenta. Este incremento de presión también afecta a otros tejidos de la extremidad, reflejándose en la dureza general de los tejidos (Steinberg B. , 2005). El método de medición de la dureza superficial de las extremidades utiliza el análisis de la curva de indentación, la cual se genera cuando el dispositivo de medición presiona sobre la extremidad. Esta curva indica la profundidad de la indentación en relación con la fuerza ejercida por el dispositivo (Dickson et al., 2003). En 1994, Steinberg y Gelberman construyeron un dispositivo diseñado para medir la dureza del tejido de las extremidades como un medio para derivar la IMP (Steinberg y Gelberman, 1994). El dispositivo fue probado inicialmente en tres perros y luego en seis pacientes con síndrome compartimental confirmado. El coeficiente de correlación con la medición de IMP en estos casos varió entre 0,87 y 0,99 (Steinberg & Gelberman, 1994) . Posteriormente, el dispositivo fue probado en 75 pacientes con sospecha de síndrome compartimental. Los resultados mostraron una especificidad del 82% en la detección del síndrome compartimental, en comparación con el 96% del método invasivo de medición de IMP. Por lo tanto, el estudio no respaldó el uso del dispositivo basado en la dureza del tejido para el diagnóstico del síndrome compartimental (Dickson et al., 2003).

En 2004, se desarrolló una segunda versión patentada del dispositivo. Las pruebas de esta versión se realizaron en 71 compartimentos de las extremidades de 18 pacientes sanos, utilizando el inflado del manguito para simular el aumento de presión (Steinberg, 2005). Los resultados de la medición se compararon con los obtenidos por el monitor de presión Stryker, logrando un coeficiente de correlación de 0,84 y mostrando una fuerte dependencia lineal de la dureza del tejido con la IMP (Taylor, Sullivan, & Mehta, 2012). Los factores que más influyeron en los resultados de la medición fueron el género y la cantidad de grasa subcutánea en las extremidades. En 2011, el dispositivo se probó ampliamente en

205 compartimentos de las extremidades y los resultados se compararon con las mediciones de IMP, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,78 (Steinberg, 2005).

Otro grupo de investigación desarrolló un dispositivo para medir la dureza del tejido y lo probó en los antebrazos de 189 niños y 20 pacientes adultos. Los resultados mostraron una relación no lineal entre la IMP y la dureza del tejido. Los factores que más influyeron en la medición fueron la edad del niño, el lugar de la medición en la extremidad, el brazo dominante y la contracción activa de los músculos durante la medición (Joseph et al., 2006). Un dispositivo experimental basado en el mismo principio se probó en cinco pacientes, mostrando un coeficiente de correlación de 0,88 con las mediciones de IMP (Meyer et al., 2002).

La mayoría de los estudios han demostrado una correlación entre la dureza del tejido y la IMP. Aunque las mediciones con este método no son continuas, debido a su naturaleza no invasiva, pueden repetirse con frecuencia. Los factores que pueden sesgar los resultados incluyen la cantidad de grasa subcutánea, la edad y el sexo del paciente. Sin embargo, no se han publicado estudios adicionales que utilicen este método desde 2011.

Espectroscopia de Infrarrojo Cercano

La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) es un método que utiliza radiación electromagnética en longitudes de onda del infrarrojo cercano para determinar el estado de oxigenación de la hemoglobina. Este método ha sido ampliamente estudiado en los últimos años para monitorear la oxigenación del cerebro y los músculos (Barstow, 2019). La oxigenación tisular disminuye con la reducción del flujo sanguíneo, que es menor en el síndrome compartimental debido a una presión de perfusión capilar (CPP) más baja (Shuler et al., 2011). NIRS permite una medición simple, no invasiva y continua, aunque tiene la desventaja de que la radiación solo penetra unos centímetros debajo de la piel, por lo que no alcanza, por ejemplo, el compartimento posterior profundo de la pierna (Scheeren, Schober, & Schwarte, 2012).

Los factores que reducen la precisión del método incluyen la reducción global de la oxigenación tisular y la variabilidad en el tamaño y la anatomía de las extremidades. Además, la medición puede verse influenciada por la concentración de otras sustancias que absorben o reflejan la radiación infrarroja cercana, como el pigmento de la piel. También puede verse afectada por la formación de hematomas

cerca del sitio de medición (Scheeren, Schober, & Schwarte, 2012). Para minimizar errores, es aconsejable usar una medición de control en el compartimento contralateral, evitando así los errores derivados de una falta global de oxígeno o de una mayor pigmentación de la piel. Tras una lesión en la extremidad, se desarrolla hiperemia en el sitio de la lesión, lo que incrementa los valores de saturación de oxígeno (Shuler et al., 2011).

Cuando se desarrolla el síndrome compartimental, la saturación tisular regional (StO₂) disminuye. Por lo tanto, es crucial monitorear continuamente los cambios en StO₂ a lo largo del tiempo (Shuler et al., 2011). Aunque las lesiones bilaterales son comunes, no es adecuado utilizar compartimentos en las extremidades superiores para mediciones de control en lesiones de las extremidades inferiores. El lugar más apropiado para la medición de control es el compartimento contralateral (Jackson et al., 2013).

Los primeros estudios que evaluaron la idoneidad de NIRS para la detección del síndrome compartimental se publicaron a principios del milenio. Garr et al. probaron la correlación de los resultados de NIRS con las mediciones de IMP y los signos clínicos en un modelo animal (Garr, Gentilello et al., 1999). Utilizaron un globo de catéter inflado en las extremidades traseras de cerdos domésticos, encontrando una fuerte correlación inversa entre la concentración de oxihemoglobina en el tejido y la IMP medida ($r = -0,78$). Budsberg et al. utilizaron un método similar en un modelo animal, confirmando una relación inversa entre la IMP y el valor de oxigenación. Este estudio también mostró que el aumento de IMP incrementa la hinchazón del tejido y reduce la CPP en el compartimento.

NIRS también se probó en pacientes con diagnóstico clínico confirmado de síndrome compartimental. Los compartimentos afectados mostraron StO₂ de $56 \pm 27\%$ e IMP de 64 ± 17 mm Hg antes de la fasciotomía. Después de la fasciotomía, los valores de IMP volvieron a la normalidad y StO₂ aumentó a $82 \pm 16\%$. Las mediciones en el deltoides de los mismos pacientes mostraron una oxigenación tisular media del 83%-87% durante toda la medición. Las pantorrillas y los deltoides de los pacientes del grupo de control estuvieron en el mismo rango de valores de StO₂ (Giannotti et al., 2000).

El problema de obtener datos clínicamente útiles en mediciones continuas también fue reportado por Shuler et al. en un ensayo clínico para validar NIRS como método de detección del síndrome compartimental. En este estudio, NIRS se utilizó en los cuatro compartimentos de ambas extremidades inferiores de 86 pacientes con una lesión en una extremidad. Los valores promedio de oxigenación de

las extremidades no lesionadas oscilaron entre el 69% y el 72%, mientras que en las extremidades lesionadas, la oxigenación fue en promedio un 3% más alta. Las siete extremidades con síndrome compartimental confirmado tenían una oxigenación al menos un 3% más baja en al menos un compartimento en comparación con los compartimentos no lesionados. Los autores concluyeron que NIRS puede ser una herramienta diagnóstica adecuada para el síndrome compartimental, pero requiere mayor validación y confiabilidad en la adquisición de datos (Shuler et al., 2018).

Actualmente, se están realizando más ensayos clínicos y la detección del síndrome compartimental mediante NIRS es el método más estudiado hasta la fecha (Walters et al., 2019).

Ultrasonido

La ecografía diagnóstica es un método de obtención de imágenes muy utilizado. Las imágenes del compartimento muscular no revelan información sobre el desarrollo del síndrome compartimental (ECS). Sin embargo, la ecografía clásica en modo B del compartimento muscular se ha utilizado para medir el ángulo tibiofascial, es decir, el ángulo entre la corteza anterolateral de la tibia y el compartimento anterior de la extremidad inferior (Mühlbacher et al., 2019). Según los autores, el ángulo medido debería aumentar durante la expansión y el aumento de presión en el compartimento anterior. Esta hipótesis se puso a prueba en 40 extremidades de cadáveres con ECS simulado. El estudio confirmó que el ángulo tibiofascial aumentó de $61^{\circ} (\pm 12,0^{\circ})$ a 10 mmHg a $81^{\circ} (\pm 11,1^{\circ})$ a 100 mmHg. Sin embargo, esta medición solo es aplicable al compartimento anterior de la extremidad inferior y no se ha verificado en sujetos vivos (Mühlbacher et al., 2019).

La obtención de imágenes de un compartimento con riesgo de desarrollar ECS puede revelar hematomas que podrían causar ECS. Los hematomas no son un requisito previo para el ECS, pero en casos específicos, una ecografía puede ayudar a realizar el diagnóstico, como se muestra en dos estudios de casos recientes (Eicken & Morrow, 2019) (Long, Ahn, & Kim, 2021).

Existen tres métodos que utilizan ultrasonidos y pueden proporcionar más información sobre la dureza de los tejidos en el compartimento o el propio IMP. El primero es un bucle de bloqueo de fase pulsado (PPLL). Este método aprovecha el hecho de que la onda de pulso periférica crea oscilaciones de la fascia compartimental. La amplitud de estas oscilaciones se ve afectada por el IMP en el compartimento (Lynch et al., 2009). Los otros dos métodos son la elastografía por ondas de corte (SWE) y la

elastografía por deformación (SE). Los métodos elastográficos intentan medir y cuantificar la dureza de los tejidos con la ayuda de ondas ultrasónicas (Kim et al., 2018).

Bucle de Bloqueo de Fase Pulsado (PPLL)

El método PPLL utiliza una sonda de ultrasonidos equipada con un detector de fase preciso que permite comparar el cambio de fase de las ondas reflejadas con la fase de las ondas transmitidas. El cambio de fase se produce por ligeros cambios en la frecuencia de la onda reflejada causados por el movimiento de la fascia hacia o desde la sonda (Lee et al., 2013) . Usando el método PPLL, es posible monitorear pequeños cambios en la posición del tejido objetivo del orden de micrómetros. El monitoreo de los movimientos de la fascia compartimental durante las pulsaciones arteriales se utiliza para la medición indirecta de IMP. Se supone que a mayor IMP, aumenta la amplitud de los desplazamientos de la fascia debido a las pulsaciones arteriales. En el síndrome compartimental de la pierna o el antebrazo, se utiliza el monitoreo de la membrana interósea (Madeja et al., 2022).

Un estudio en un modelo animal monitoreó IMP en cerdos sedados con compartimentos contralaterales como grupo de control. Se monitoreó la amplitud de los desplazamientos de la fascia y, para cada aumento de presión, se calculó la CPP. El análisis posterior de los resultados mostró que para valores de CPP de 80 a -40 mmHg, el cambio en la amplitud de desplazamiento difiere significativamente entre los compartimentos probados en comparación con los controles. El desplazamiento fascial en los compartimentos monitoreados en cada cambio en CPP fue significativamente mayor que en los compartimentos de control (-20-40 mmHg). La sensibilidad del método se determinó en 0,74 y la especificidad en 0,75. Los resultados proporcionan evidencia de la corrección de la hipótesis de que los compartimentos con CPP baja se caracterizan por una mayor amplitud de desplazamientos de la fascia durante las pulsaciones arteriales. Con el aumento de la hinchazón y la dureza muscular, la transferencia de presión de las pulsaciones arteriales a la fascia muscular debería cambiar teóricamente y, por lo tanto, la amplitud de su desplazamiento debería aumentar (Garabekyan et al., 2009).

Un estudio de Lee et al. (2013) comparó los métodos PPLL y NIRS junto con la medición de IMP con un catéter de hendidura. Se probaron quince voluntarios sanos en los que se aumentó artificialmente la IMP utilizando una cámara de presión. Se recogieron valores NIRS para cada valor de presión establecido por la cámara después de terminar la medición de PPLL. Los resultados mostraron una

correlación estadísticamente significativa entre IMP y amplitud de desplazamiento en PPLL y entre IMP y oxigenación tisular medida por NIRS. El valor de corte para la presencia de síndrome compartimental se tomó como 30 mmHg de IMP. Según estos criterios, la sensibilidad y especificidad para PPLL fueron 0,75 y para NIRS ambos valores fueron 0,65. Por lo tanto, según este estudio, el método de ultrasonido PPLL parece ser mejor para la detección de ECS (Lee et al., 2013). Según Wiemann et al. (2006), PPLL puede detectar aumentos en IMP y, por lo tanto, se ofrece como un método adecuado para el diagnóstico de ECS (Wiemann et al., 2006).

Elastografía de Deformación

La segunda categoría de métodos de ECS que utilizan ultrasonidos es la elastografía de deformación, que utiliza la compresión manual de los tejidos con una sonda de ultrasonidos mientras se controla la presión de la sonda que actúa sobre la piel (Rominger, Lukosch, & Bachmann, 2004). De esta manera, es posible medir el elastograma cualitativo del tejido examinado, donde es posible discriminar entre tejidos blandos y duros, porque los tejidos más duros muestran un menor grado de deformación cuando el área es comprimida por la sonda. En cierto modo, la medición es como la medición de la dureza del tejido mencionada anteriormente, pero con la ventaja de medir las dimensiones del compartimento que se ven afectadas por la fuerza de compresión de la sonda. El accesorio del sensor de presión en la sonda está lleno de agua para minimizar el efecto en la configuración de la medición (Sadeghi et al., 2019). Sellei R. et al. (2015) utilizaron este método en varios estudios. En el estudio piloto, utilizaron un modelo ECS (un recipiente lleno de agua) y en el segundo estudio, se centraron en extremidades de cadáveres humanos. Estos estudios compararon la profundidad del compartimento sin presión de sonda con la profundidad a una presión de sonda de 100 mm Hg. Se calculó la diferencia de profundidad creada al comprimir el compartimento. En ambos estudios, este procedimiento se utilizó para diferentes valores de IMP inducido artificialmente de 0 a 80 mm Hg. Ambos estudios mostraron una fuerte dependencia de la diferencia de profundidad medida en IMP. Los resultados mostraron una buena repetibilidad de las mediciones. Sin embargo, no se pueden esperar los mismos resultados al aplicar el método a pacientes vivos, porque las propiedades anisotrópicas de los músculos humanos probablemente sesguen la medición. El ECS no se puede modelar con precisión ni siquiera en extremidades de cadáveres (Sellei et al., 2015).

Un estudio de caso que incluyó a seis sujetos mostró resultados prometedores para detectar ECS al comparar la elasticidad relativa del compartimento del músculo tibial anterior con el compartimento contralateral en la extremidad no lesionada (Sellei et al., 2015). La elasticidad relativa del compartimento de menos del 10,5% tuvo una sensibilidad del 95,8% y una especificidad del 87,5% para diagnosticar ECS. Los autores estudiaron más a fondo este método y su repetibilidad inter e intraobservador en un modelo in vitro. Aunque la repetibilidad de las mediciones fue alta, el proceso de medición podría automatizarse para aumentar tanto la repetibilidad como la simplicidad de uso del método (Sellei et al., 2015).

Marmor et al. (2019) utilizaron la elastografía de deformación para analizar el compartimento anterior en 6 piernas de cadáveres humanos utilizando el modelo de infusión salina ECS. Los valores medidos de la profundidad del compartimento y los valores de la presión aplicada necesaria para cambiar esta profundidad se compararon con los valores de IMP medidos de forma invasiva con un monitor de presión Stryker. Los resultados del estudio muestran una alta correlación de los parámetros medidos con los valores de IMP. Según los autores, se puede lograr una correlación más alta al comparar un compartimento lesionado con el compartimento contralateral de control. En este estudio, los autores introdujeron el marcador CFFP (Compartment Fascia Flattening Pressure), es decir, la presión que la sonda debe ejercer sobre la extremidad para que la fascia del compartimento cambie de forma de convexa a completamente plana (Marmor et al., 2021).

Este coeficiente se utilizó luego en otro estudio, donde se verificó el valor diagnóstico de este coeficiente en 10 pacientes con lesiones en las extremidades inferiores sin signos de ECS y 3 pacientes con un diagnóstico clínico de ECS. La CFFP media para el grupo de pacientes sin ECS fue de 8 mmHg, mientras que, para los pacientes con un diagnóstico confirmado, el valor de este coeficiente fue de alrededor de 117 mmHg (Herring, Donohoe, & Marmor, 2019). Bloch et al. (2018) en su estudio probaron la elastografía de deformación en un modelo animal de ECS utilizando 8 cerdos domésticos infundidos con solución salina en el compartimento tibial anterior. El parámetro medido fue la relación de elasticidad que se define como la relación entre la profundidad del compartimento con la presión externa aplicada de la sonda y la profundidad del compartimento sin compresión. Se eligió una IMP mayor o igual a 30 mmHg como criterio para la aparición de ECS. A esta presión, la relación medida

de elasticidad del compartimento alcanzó el 87,1% con valores de sensibilidad del 94,4% y especificidad del 88,9%.

Los resultados de los estudios disponibles sobre elastografía de deformación confirman que este método podría ser una alternativa no invasiva adecuada para la detección de ECS. En comparación con la medición cuantitativa de la dureza del tejido, este método tiene la ventaja de poder ver todo el compartimento e ignorar obstáculos en forma de grasa subcutánea o hematomas. Este método también se puede utilizar para monitorear el desarrollo de ECS incluso en el compartimento posterior profundo (Ohta et al., 2021). La ventaja de este método es el uso de dispositivos disponibles comercialmente, es decir, la sonda lineal de ultrasonidos clásica en modo B y un sensor de presión. Sin embargo, a pesar de los buenos resultados, la precisión y la confiabilidad del método no se pueden determinar debido al pequeño tamaño de la muestra y la aplicación en un modelo (Shaaban-Ali, Momeni, & Denault, 2021).

DISCUSIÓN

El diagnóstico del síndrome compartimental sigue siendo un desafío considerable debido a la falta de métodos objetivamente cuantificables para la detección temprana. Actualmente, la evaluación se basa en gran medida en síntomas clínicos, que requieren la cooperación del paciente y son menos efectivos en situaciones donde el paciente está inconsciente, en estado de shock, o no puede comunicarse adecuadamente (Ulmer, 2002; Schmidt, 2017). La medición directa de la presión intracraneal (IMP) es el único método objetivo disponible, pero su uso se limita a casos con síntomas ambiguos o como complemento a otras pruebas. Por lo tanto, existe una necesidad urgente de métodos de diagnóstico más precisos y accesibles para detectar el síndrome compartimental en sus etapas iniciales (Donaldson, Haddad, & Khan, 2014; Tran et al., 2020).

Los signos clínicos tradicionales del síndrome compartimental incluyen las “cinco P” (dolor, palidez, ausencia de pulso, parálisis y parestesia), que suelen ser indicadores generales del incremento de presión intramuscular. Sin embargo, estos signos pueden ser insuficientes o poco específicos, especialmente en fases tempranas de la enfermedad (Donaldson, Haddad, & Khan, 2014; Tran et al., 2020). La combinación de palpación con la identificación de estos signos puede ofrecer una alta especificidad, pero la sensibilidad es baja y depende en gran medida de la cooperación del paciente. Además, el uso de bloqueos nerviosos para aliviar el dolor en casos de traumatismos ortopédicos puede enmascarar la

presencia del síndrome compartimental, complicando aún más el diagnóstico (Whitesides & Heckman, 1996).

Una alternativa prometedora es la medición cuantitativa de la dureza del tejido, la cual está relacionada con el aumento de la IMP en el síndrome compartimental. Aunque dispositivos desarrollados para medir la dureza del tejido han mostrado correlaciones significativas con IMP, su uso ha sido limitado (Steinberg, 2005). Los primeros dispositivos mostraron coeficientes de correlación elevados, pero la especificidad fue menor en comparación con la medición directa de IMP. A pesar de las mejoras en versiones posteriores de estos dispositivos, como la segunda versión patentada, los resultados siguen mostrando limitaciones en la sensibilidad y especificidad, lo que plantea dudas sobre su aplicación generalizada en la práctica clínica (Steinberg & Gelberman, 1994; Joseph et al., 2006).

Por otro lado, la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) ha emergido como una herramienta no invasiva para monitorear la oxigenación tisular y, por ende, detectar el síndrome compartimental (Giannotti et al., 2000). La disminución de la saturación de oxígeno tisular (StO₂) en presencia de una IMP elevada refleja una relación inversa que podría indicar la presencia del síndrome (Shuler et al., 2018). Aunque NIRS permite mediciones continuas y no invasivas, su precisión se ve afectada por factores como la variabilidad en el tamaño y la anatomía de las extremidades, así como la presencia de pigmento en la piel y hematomas. La necesidad de controlar estos factores es crucial para evitar errores en la interpretación de los datos (Walters et al., 2019).

La ecografía, aunque útil para detectar hematomas que podrían causar síndrome compartimental, no proporciona información directa sobre el desarrollo de la enfermedad (Mühlbacher et al., 2019). Métodos como el bucle de bloqueo de fase pulsado (PPLL) y la elastografía por ondas de corte (SWE) han sido evaluados para medir la dureza del tejido y la IMP (Madeja et al., 2022). El método PPLL muestra una correlación significativa entre el desplazamiento de la fascia y la IMP, aunque con una sensibilidad y especificidad moderadas (Rominger, Lukosch, & Bachmann, 2004). Por su parte, la elastografía de deformación ha mostrado ser una herramienta prometedora, con buenos resultados en estudios de cadáveres y modelos animales, aunque su aplicabilidad y precisión en pacientes vivos aún requieren validación adicional (Sellei et al., 2015; Sadeghi et al., 2019).

CONCLUSIONES

Aunque los métodos actuales para el diagnóstico del síndrome compartimental presentan limitaciones, la evolución hacia técnicas más objetivas y menos invasivas ofrece esperanzas para una mejora en la detección temprana. La medición directa de la presión compartimental sigue siendo crucial, pero la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) y los métodos de ultrasonido, como la elastografía por deformación y el bucle de bloqueo de fase pulsado (PPLL), muestran potencial para complementar o, en algunos casos, reemplazar los enfoques tradicionales. Estos métodos emergentes, al ofrecer datos sobre la rigidez del tejido y la oxigenación tisular, podrían superar las limitaciones de la dependencia de los síntomas clínicos y la cooperación del paciente. Sin embargo, la variabilidad en los resultados y las limitaciones técnicas de cada método destacan la necesidad de estudios adicionales y la validación en poblaciones más amplias para asegurar su eficacia y fiabilidad en la práctica clínica diaria.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acuña, I., Orozco, R., & Chacón, S. (2022). Síndrome compartimental: una revisión bibliográfica. *Revista Médica Sinergia*, 7(2), e762. Obtenido de <https://revistamedicasinergia.com/index.php/rms/article/download/762/1726/5358>
- Arroyo, A., Solano, H., & Rojas, V. (2018). Síndrome Compartimental, generalidades,. *Revista Clínica de la Escuela de Medicina UCR – HSJD*, 8(2), 11-24. Obtenido de <https://www.medigraphic.com/pdfs/revcliescmed/ucr-2018/ucr182e.pdf>
- Barstow, T. (2019). Understanding near infrared spectroscopy and its application to skeletal muscle research. *Journal of applied physiology*, 126(5), 1360-1376. doi: <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00166.2018>
- Bloch, A., Tomaschett, C., Jakob, S., Schwinghammer, A., & Schmid, T. (2018). Compression sonography for non-invasive measurement of lower leg compartment pressure in an animal model. *Injury*, 49(3), 532-537. doi: <https://doi.org/10.1016/j.injury.2017.11.036>
- Dickson, K., Sullivan, M., Steinberg, B., Myers, L., Anderson, E., & Harris, M. (2003). Noninvasive measurement of compartment syndrome. *Orthopedics*, 26(12), 1215-1218. doi: <https://doi.org/10.3928/0147-7447-20031201-11>



- Donaldson, J., Haddad, B., & Khan, W. (2014). The pathophysiology, diagnosis and current management of acute compartment syndrome. *The open orthopaedics journal*, 8, 185-193. doi: <https://doi.org/10.2174/1874325001408010185>
- Eicken, J., & Morrow, D. (2019). Limb threatening thigh hematoma diagnosis accelerated by emergency physician bedside ultrasound. *SAGE open medical case reports*, 7. doi: <https://doi.org/10.1177/2050313X19848589>
- Falcón, J., Navarro, R., Ruiz, J., Jiménez, J., & Brito, E. (2009). Fisiopatología, Etiología y Tratamiento del Síndrome Compartimental (revisión). *Canarias Médica y Quirúrgica*, 7(20), 14-18. Obtenido de https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/5893/1/0514198_00020_0003.pdf
- Garabekyan, T., Murphey, G., Macias, B., Lynch, J., & Hargens, A. (2009). New noninvasive ultrasound technique for monitoring perfusion pressure in a porcine model of acute compartment syndrome. *Journal of orthopaedic trauma*, 23(3), 186-194. doi: <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e31819901db>
- Garr, J., Gentilello, L., Cole, P., Mock, C., & Matsen, F. (1999). Monitoring for compartmental syndrome using near-infrared spectroscopy: a noninvasive, continuous, transcutaneous monitoring technique. *The Journal of trauma*, 46(4), 613-618. doi: <https://doi.org/10.1097/00005373-199904000-00009>
- Giannotti, G., Cohn, S., Brown, M., Varela, J., McKenney, M., & Wiseberg, J. (2000). Utility of near-infrared spectroscopy in the diagnosis of lower extremity compartment syndrome. *The Journal of trauma*, 48(3), 396-401. doi: <https://doi.org/10.1097/00005373-200003000-00005>
- Herring, M., Donohoe, E., & Marmor, M. (2019). A Novel Non-invasive Method for the Detection of Elevated Intra-compartmental Pressures of the Leg. *Journal of visualized experiments : JoVE*, 147. doi: <https://doi.org/10.3791/5988710.3791/59887>
- Jackson, K., Cole, A., Potter, B., Shuler, M., Kinsey, T., & Freedman, B. (2013). Identification of optimal control compartments for serial near-infrared spectroscopy assessment of lower extremity compartmental perfusion. *Journal of surgical orthopaedic advances*, 22(1), 2-9. doi: <https://doi.org/10.3113/jsoa.2013.0002>



- Jägera, C., & Zeichena, J. (2012). Síndrome compartimental agudo de la pierna. *Técnicas Quirúrgicas en Ortopedia y Traumatología*, 21(2), 59-69. Obtenido de <https://www.elsevier.es/es-revista-tecnicas-quirurgicas-ortopedia-traumatologia-41-articulo-sindrome-compartimental-agudo-pierna-X1132195412431054>
- Joseph, B., Varghese, R., Mulpuri, K., Paravatty, S., Kamath, S., & Nagaraja, N. (2006). Measurement of tissue hardness: can this be a method of diagnosing compartment syndrome noninvasively in children? *Journal of pediatric orthopedics*, 15(6), 443-448. doi: <https://doi.org/10.1097/01.bpb.0000236226.21949.5c>
- Kim, H., Kim, S., Kim, B., La Yun, B., Jang, M., Ko, Y., . . . Cho, N. (2018). Comparison of strain and shear wave elastography for qualitative and quantitative assessment of breast masses in the same population. *Scientific reports*, 8(1), 6197. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24377-0>
- Lee, S., Padilla, M., Lynch, J., & Hargens, A. (2013). Noninvasive Measurements of Pressure for Detecting Compartment Syndromes. *Journal of orthopedics & rheumatology*, 1(1), 5. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25328908/>
- Long, N., Ahn, J., & Kim, D. (2021). Adjunctive Use of Point of Care Ultrasound to Diagnose Compartment Syndrome of the Thigh. *POCUS journal*, 6(2), 64-66. doi: <https://doi.org/10.24908/pocus.v6i2.15185>
- Lynch, J., Lynch, J., Cole, S., Carter, J., & Hargens, A. (2009). Noninvasive monitoring of elevated intramuscular pressure in a model compartment syndrome via quantitative fascial motion. *Journal of orthopaedic research : official publication of the Orthopaedic Research Society*, 27(4), 489-494. doi: <https://doi.org/10.1002/jor.20778>
- Madeja, R., Pometlová, J., Brzóska, R., Voves, J., Bialy, L., Pleva, L., . . . Čabanová, K. (2022). Outcomes of Mini-Invasive Arthroscopic Arthrolysis Combined with Locking Screw and/or Intramedullary Nail Extraction after Osteosynthesis of the Proximal Humerus Fracture. *Journal of clinical medicine*, 11(2), 362. doi: <https://doi.org/10.3390/jcm11020362>
- Marmor, M., Barker, J., Matz, J., Donohoe, E., & Herring, M. (2021). A dual-sensor ultrasound based method for detecting elevated muscle compartment pressures: A prospective clinical pilot study. *Injury*, 52(8), 2166-2172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.injury.2021.02.054>

- Meyer, R., White, K., Smith, J., Groppo, E., Mubarak, S., & Hargens, A. (2002). Intramuscular and blood pressures in legs positioned in the hemilithotomy position : clarification of risk factors for well-leg acute compartment syndrome. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 84(10), 1829-1835. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12377915/>
- Mubarak, S., Owen, C., Hargens, A., Garetto, L., & Akeson, W. (1978). Acute compartment syndromes: diagnosis and treatment with the aid of the wick catheter. *The Journal of bone and joint surgery. American*, 60(8), 1091-1095. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/721856/>
- Mühlbacher, J., Pauzenberger, R., Asenbaum, U., Gauster, T., Kapral, S., Herkner, H., & Duma, A. (2019). Feasibility of ultrasound measurement in a human model of acute compartment syndrome. *World journal of emergency surgery*, 14(4). doi: <https://doi.org/10.1186/s13017-019-0222-9>
- Ohta, H., Vo, N., Hata, J., Terawaki, K., Shirakawa, T., & Okano, H. (2021). Utilizing Dynamic Phosphorous-31 Magnetic Resonance Spectroscopy for the Early Detection of Acute Compartment Syndrome: A Pilot Study on Rats. *Diagnostics*, 11(4), 589. doi: <https://doi.org/10.3390/diagnostics11040586>
- Olán, A., Manzo, H., Hurtado, G., Nájera, J., Arreola, J., & San Pedro, I. (2023). Síndrome compartimental en extremidades. *Cirujano General*, 45(1), 27-37. doi: <https://doi.org/10.35366/110700>
- Pablo-Márquez, B., Quintas-Álvarez, S., Solá-Ruano, L., & Castellón-Bernal, P. (2014). Síndrome compartimental agudo. *Medicina de Familia. SEMERGEN*, 40(4), 226-228. doi: <https://www.elsevier.es/es-revista-medicina-familia-semergen-40-articulo-sindrome-compartimental-agudo-S1138359314000616>
- Rominger, M., Lukosch, C., & Bachmann, G. (2004). MR imaging of compartment syndrome of the lower leg: a case control study. *European radiology*, 14(8), 1432-1439. doi: <https://doi.org/10.1007/s00330-004-2305-5>
- Sadeghi, S., Johnson, M., Bader, D., & Cortes, D. (2019). The shear modulus of lower-leg muscles correlates to intramuscular pressure. *Journal of biomechanics*, 83, 190-196. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.11.045>



- Scheeren, T., Schober, P., & Schwarte, L. (2012). Monitoring tissue oxygenation by near infrared spectroscopy (NIRS): background and current applications. *Journal of clinical monitoring and computing*, 26(4), 279-287. doi: <https://doi.org/10.1007/s10877-012-9348-y>
- Schmidt, A. (2017). Acute compartment syndrome. *Injury*, 48(1), 22-25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.injury.2017.04.024>
- Sellei, R., Hingmann, S., Kobbe, P., Weber, C., Grice, J., Zimmerman, F., . . . Pape, H. (2015). Compartment elasticity measured by pressure-related ultrasound to determine patients "at risk" for compartment syndrome: an experimental in vitro study. *Patient safety in surgery*, 9(1), 4. doi: <https://doi.org/10.1186/s13037-014-0051-4>
- Shaaban-Ali, M., Momeni, M., & Denault, A. (2021). Clinical and Technical Limitations of Cerebral and Somatic Near-Infrared Spectroscopy as an Oxygenation Monitor. *Journal of cardiothoracic and vascular anesthesia*, 35(3), 763-779. doi: <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2020.04.054>
- Shuler, M., Reisman, W., Cole, A., Whitesides, T., & Moore, T. (2011). Near-infrared spectroscopy in acute compartment syndrome: Case report. *Injury*, 42(12), 1506-1508. doi: <https://doi.org/10.1016/j.injury.2011.03.022>
- Shuler, M., Roskosky, M., Kinsey, T., Glaser, D., Reisman, W., Ogburn, C., . . . Freedman, B. (2018). Continual near-infrared spectroscopy monitoring in the injured lower limb and acute compartment syndrome: an FDA-IDE trial. *The bone & joint journal*, 100(6), 787-797. doi: <https://doi.org/10.1302/0301-620X.100B6.BJJ-2017-0736.R3>
- Steinberg, B. (2005). Evaluation of limb compartments with increased interstitial pressure. An improved noninvasive method for determining quantitative hardness. *Journal of biomechanics*, 38(8), 1629-1635. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.07.030>
- Steinberg, B., & Gelberman, R. (1994). Evaluation of limb compartment with suspected increased interstitial pressure. A noninvasive method for determining quantitative hardness. *Clinical orthopaedics and related research*, 300, 248-253. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8131344/>

- Taylor, R., Sullivan, M., & Mehta, S. (2012). Acute compartment syndrome: obtaining diagnosis, providing treatment, and minimizing medicolegal risk. *Current reviews in musculoskeletal medicine*, 5(3), 206-213. doi: <https://doi.org/10.1007/s12178-012-9126-y>
- Tran, A., Lee, D., Fassihi, S., Smith, E., Lee, R., & Siram, G. (2020). A systematic review of the effect of regional anesthesia on diagnosis and management of acute compartment syndrome in long bone fractures. *European journal of trauma and emergency surgery : official publication of the European Trauma Society*, 46(6), 1281-1290. doi: <https://doi.org/10.1007/s00068-020-01320-5>
- Ulmer, T. (2002). The Clinical Diagnosis of Compartment Syndrome of the Lower Leg: Are Clinical Findings Predictive of the Disorder? *Journal of Orthopaedic Trauma*, 16(8), 572-577. Obtenido de https://journals.lww.com/jorthotrauma/abstract/2002/09000/the_clinical_diagnosis_of_compartment_syndrome_of.6.aspx
- Walters, T., Kottke, M., Hargens, A., & Ryan, K. (2019). Noninvasive diagnostics for extremity compartment syndrome following traumatic injury: A state-of-the-art review. *The journal of trauma and acute care surgery*, 87(1), 59-66. doi: <https://doi.org/10.1097/TA.0000000000002284>
- Whitesides, T., & Heckman, M. (1996). Acute Compartment Syndrome: Update on Diagnosis and Treatment. *The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 4(4), 209-218. doi: <https://doi.org/10.5435/00124635-199607000-00005>
- Wiemann, J., Ueno, T., Leek, B., Yost, W., Schwartz, A., & Hargens, A. (2006). Noninvasive measurements of intramuscular pressure using pulsed phase-locked loop ultrasound for detecting compartment syndromes: a preliminary report. *Journal of orthopaedic trauma*, 20(7), 458-463. doi: <https://doi.org/10.1097/00005131-200608000-00002>