

doi: 10.63360/ipmm.v1.e17

Estudio preclínico y experimental de laboratorio

Cuantificación de la resolución temporal de los cambios ecográficos inducidos por gas tras la electrólisis percutánea en tejido tendinoso. Estudio cadavérico

Miguel Malo-Urriés^{1,2}  0000-0002-9779-4323

Jacobo Rodríguez-Sanz^{3,4}   0000-0003-0419-1943

Sergio Borrella-Andrés¹  0000-0002-9354-2938

Isabel Albarova-Corral¹  0000-0003-1292-3163

Izarbe Ríos-Asín¹  0009-0007-7344-9107

Carlos López-de-Celis^{4,5,6}  0000-0002-9524-4248

¹Facultad de Ciencias de la Salud, Departamento de Fisiatría y Enfermería, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, España.

²Grupo de Investigación en Ciencias de la Salud PhysiUZerapy, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, España.

³Departamento de Medicina, Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud, Universitat Internacional de Catalunya (UIC), Josep Trueta s/n, 08195 Sant Cugat del Vallès, España.

⁴Grupo de Anatomía Funcional ACTIUM, Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud, Universitat Internacional de Catalunya (UIC), Josep Trueta s/n, 08195 Sant Cugat del Vallès, España.

⁵Departamento de Fisioterapia, Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud, Universitat Internacional de Catalunya (UIC), Josep Trueta s/n, 08195 Sant Cugat del Vallès, España.

⁶Grupo de Estudio sobre Patología del Sistema Locomotor en Atención Primaria (GEPALAP), Instituto Universitario de Investigación en Atención Primaria (IDIAP Jordi Gol), 08007 Barcelona, España.

RESUMEN

Objetivo: Evaluar cuantitativamente la evolución temporal del efecto ultrasonográfico electrolítico inducido por la electrólisis percutánea en tendones rotulianos de cadáveres y comparar el comportamiento de tres protocolos de aplicación diferentes.

Métodos: Se realizó un estudio experimental in vitro sobre tres tendones rotulianos de cadáver. Se aplicaron tres protocolos de electrólisis percutánea: Dosis A: (3 aplicaciones × 3 segundos × 3 mA), Dosis B: (3 aplicaciones × 3 segundos × 3 mA más un baño de tres agujas a 1 mA hasta 1.000 mJ), Dosis C: (baño de tres agujas a 1 mA hasta 14.000 mJ). El efecto electrolítico se cuantificó mediante análisis de imagen ecográfica en varios puntos temporales: antes del tratamiento, inmediatamente después y a los 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 60, 360 (6 h), 720 (12 h) y 1.440 minutos (24 h). Se emplearon inspección gráfica y modelos de regresión curvilínea para describir la dinámica temporal de cada protocolo.

Resultados: La Dosis A mostró una respuesta estable y reproducible, con un pico máximo a los 20 minutos (valor = 5,60), seguido de un retorno progresivo a la línea de base a las 6 horas. La Dosis B presentó mayor variabilidad, pero también retornó a valores basales hacia las 6 horas. La Dosis C evidenció la mayor dispersión, con picos altos (de 8,50 a los 20 minutos) y valores negativos persistentes a las 24 horas, sin indicios de estabilización. Los

modelos cuadrático y cúbico ofrecieron el mejor ajuste para la Dosis A, mientras que el ajuste fue menor para las Dosis B y C.

Conclusiones: El patrón temporal del efecto electrolítico varía notablemente según el protocolo empleado. La ecografía cuantitativa constituye un método objetivo y no invasivo para monitorizar los cambios producidos durante la terapia de electrólisis percutánea.

Palabras clave: Electrólisis percutánea, dosificación, ecografía cuantitativa, corriente galvánica, tendinopatía.

1. Introducción

La electrólisis percutánea terapéutica se ha consolidado como una técnica de referencia en el tratamiento de diversos trastornos musculoesqueléticos, principalmente debido a su capacidad de inducir una respuesta electroquímica controlada mediante la aplicación de corriente galvánica a través de un procedimiento similar a la punción seca⁽²⁾. Este proceso desencadena una reacción redox localizada que provoca la descomposición molecular del tejido diana, generando la liberación de hidrógeno, sodio y otros subproductos gaseosos detectables mediante ecografía⁽²⁻⁷⁾.

En el contexto de las tendinopatías y las lesiones de tejidos blandos, la electrólisis percutánea ha demostrado eficacia para modular la respuesta inflamatoria, estimular la neocolagénesis y promover la reparación tisular⁽²⁻⁷⁾. Sin embargo, la definición óptima de los parámetros de tratamiento, especialmente la intensidad de corriente, el tiempo de exposición y la carga total administrada, continúa siendo un tema abierto⁽²⁻⁹⁾. Los protocolos clínicos actuales suelen basarse en configuraciones estandarizadas⁽¹⁰⁻¹²⁾, sin considerar cómo las combinaciones específicas de intensidad y tiempo afectan dinámicamente la respuesta tisular. Los tendones son una de las estructuras más tratadas, particularmente en casos crónicos caracterizados por tejido conectivo fibrótico y desorganizado^(6,13,14). Aunque varios estudios han sugerido que la electrólisis puede favorecer la regeneración tendinosa, la evidencia clínica disponible sigue siendo limitada y heterogénea, especialmente en lo referente a los cambios ecográficos y su correlación con resultados a largo plazo^(9,15).

Algunos dispositivos modernos incorporan sistemas de dosificación basados en la resistencia tisular, lo que permite ajustes más precisos. Sin embargo, ninguno de estos enfoques considera actualmente la respuesta ecográfica como un criterio objetivo de control de dosis⁽²⁻⁹⁾. Dado que la electrólisis produce cambios visibles en la ecografía^(7,16), principalmente la aparición de microburbujas y gasificación tisular, cuantificar este efecto podría servir como biomarcador útil para guiar estrategias de dosificación en tiempo⁽²⁾. Además, una acumulación excesiva de gas puede saturar el campo ecográfico y comprometer la monitorización del procedimiento. Por ello, resulta esencial examinar cómo la combinación de parámetros, en especial la intensidad de corriente y la duración de la aplicación, influye en la magnitud y la evolución de los cambios ecográficos.

Determinar si existe un umbral a partir del cual la saturación gaseosa perjudique la visibilidad podría ser clave para una planificación del tratamiento segura y eficaz⁽²⁾. En entornos clínicos, esta ecogenicidad inducida por gas podría convertirse en una variable cuantificable para evaluar la adecuación de la dosis administrada.

Aunque el efecto de gasificación producido por la electrólisis percutánea se observa fácilmente mediante ecografía en tiempo real durante la práctica clínica, los profesionales experimentados suelen referir que esta respuesta ecogénica se atenúa progresivamente con el tiempo, normalmente en el transcurso de unas horas tras la intervención.

A pesar de ser una observación clínica constante, hasta donde saben los autores, ningún estudio ha evaluado de forma sistemática la resolución temporal de dichos cambios ecográficos.

Comprender el curso natural de este “lavado” ecogénico resulta fundamental, ya que podría reflejar las dinámicas de recuperación del tejido e influir en el momento óptimo para las sesiones posteriores. Caracterizar este fenómeno podría aportar información valiosa sobre el intervalo óptimo entre aplicaciones, especialmente en protocolos que incluyen múltiples sesiones. Por tanto, cuantificar el tiempo de desaparición de la señal ecográfica inducida por gas constituye un enfoque novedoso y potencialmente relevante para perfeccionar las estrategias de dosificación y personalizar la atención al paciente.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar cuantitativamente la evolución temporal de los cambios ecográficos inducidos por la electrólisis percutánea en tejido tendinoso de cadáver, utilizando el tendón rotuliano como modelo experimental.

Se empleó una herramienta de análisis ecográfico desarrollada por nuestro equipo, UZ eDose, para cuantificar objetivamente los cambios de ecogenicidad causados por la formación de gas^(7,17).

El estudio compara tres protocolos clínicos distintos con el fin de identificar patrones dependientes de la dosis y evaluar la estabilidad y duración de los efectos detectados por ecografía. Este enfoque puede contribuir al desarrollo de modelos de dosificación más personalizados y objetivos, basados en la respuesta fisiológica del tejido tratado.

2. Materiales and Métodos

2.1 Diseño del estudio

Se diseñó un estudio experimental *in vitro* con el objetivo de analizar la evolución temporal del efecto electrolítico inducido por la electrólisis percutánea en el tejido tendinoso de cadáver. Se aplicaron tres protocolos de electrólisis diferentes (Dosis A, B y C) sobre tendones rotulianos de cadáveres. El efecto galvánico se cuantificó de forma objetiva mediante el análisis de imágenes ecográficas con una herramienta específicamente desarrollada, UZ eDose. Esta herramienta permite medir cuantitativamente el grado de electrólisis —reflejado en la ecografía como gasificación tisular— mediante una puntuación directamente asociada a la intensidad del efecto galvánico. Las mediciones ecográficas se realizaron en múltiples momentos tras la aplicación de la electrólisis, con el fin de registrar la evolución del efecto y estimar el tiempo necesario para que el tejido regresara a su estado basal. Este estudio forma parte de un proyecto de investigación aprobado por el Comité de Ética de la Universitat Internacional de Catalunya (CBAS-2023-11). Todos los procedimientos se ajustaron a las normas de buena práctica científica en el manejo de muestras biológicas, garantizando la fiabilidad y la reproducibilidad de los datos.

2.2 Participantes

Se emplearon tres muestras de tendones rotulianos humanos de cadáver. Las muestras se conservaron a -20°C y se descongelaron a temperatura ambiente durante 48 horas antes del experimento. No se observaron marcas de intervenciones quirúrgicas previas en la zona.

2.3 Variables y seguimiento

Cada tendón recibió aleatoriamente uno de los tres protocolos de electrólisis: Dosis A: aplicación estándar de electrólisis mediante tres impulsos de 3 segundos a 3 mA (protocolo $3\times 3\times 3$). Dosis B: combinación del protocolo estándar $3\times 3\times 3$ con un baño posterior de tres agujas, aplicando una corriente continua de 1 mA hasta alcanzar una energía total de 1.000 mJ. Dosis C: aplicación exclusiva del protocolo de baño con tres agujas a 1 mA, hasta una energía acumulada de 14.000 mJ, sin la fase inicial estándar.

Durante cada intervención, el tendón se posicionó para reproducir las condiciones clínicas habituales, manteniendo un ángulo de flexión de la rodilla de 15° en todas las muestras. El procedimiento se realizó bajo control ecográfico, en vista longitudinal del tendón rotuliano, mediante un abordaje *in-plane*, con inserción de la aguja de distal a proximal. La corriente galvánica fue aplicada por un especialista con más de 10 años de experiencia en técnicas invasivas guiadas por ecografía y con formación específica en electrólisis percutánea. Se utilizaron agujas Agupunt® de 40 mm de longitud y 0,30 mm de diámetro, y la corriente se administró mediante el dispositivo Bipolar System, diseñado para la aplicación controlada de corriente galvánica.

Las evaluaciones ecográficas cuantitativas mediante UZ eDose se realizaron en los siguientes momentos temporales: pretratamiento (línea basal, sin electrólisis), postratamiento: inmediatamente (0 min), 30 s, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min, 5 min, 10 min, 20 min, 30 min y a las 1, 6, 12 y 24 horas.

Las imágenes se obtuvieron con un dispositivo ecográfico portátil GE Vscan, inmediatamente tras cada aplicación (ver Figura 1). Se adquirieron imágenes longitudinales *in-plane*, seleccionando el mejor fotograma disponible que captara con precisión el área tratada. La evaluación ecográfica fue realizada por un experto con más de 15 años de experiencia en ecografía musculoesquelética (MSK), lo que garantizó una interpretación consistente y fiable de los cambios ecogénicos observados.

Todas las imágenes fueron cuantificadas utilizando UZ eDose, una función específica del software UZ qTool que permite la evaluación objetiva de los efectos ecográficos inducidos por la electrólisis en el tejido tendinoso.

El software extrae métricas cuantitativas de la imagen ecográfica, proporcionando información detallada sobre los cambios en la textura, la ecogenicidad y la estructura interna del tendón tras la estimulación galvánica.

Los valores más altos de la puntuación UZ eDose corresponden a un efecto electrolítico mayor, lo que refleja una mayor liberación de hidrógeno y una gasificación tisular.

Esta cuantificación facilita la identificación de patrones de respuesta y de posibles umbrales de dosis según la reacción tisular.

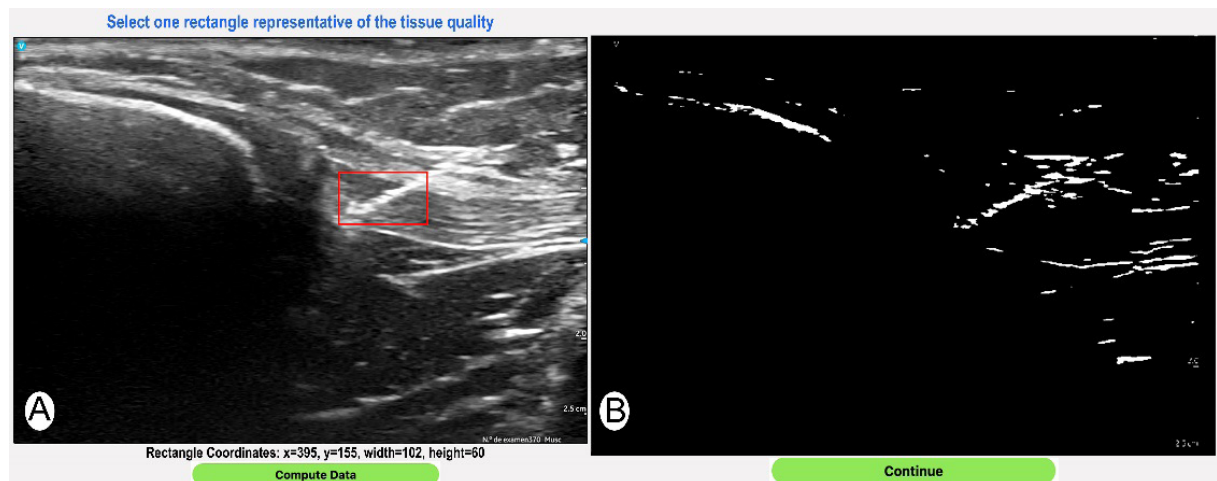


Figura 1. Ejemplo de análisis de gasificación con UZ eDose.

2.4 Riesgo de sesgo

El estudio presenta ciertas limitaciones metodológicas que podrían introducir sesgos:

Número limitado de muestras: solo se utilizaron tres tendones rotulianos cadavéricos, lo que limita la generalización de los resultados y aumenta la susceptibilidad al sesgo derivado de la variabilidad biológica.

Subjetividad en la selección del fotograma ecográfico: aunque la cuantificación es automatizada, el operador seleccionó el “mejor fotograma disponible” de la secuencia longitudinal, lo que introduce subjetividad y un posible sesgo de selección, especialmente si conocía el protocolo aplicado.

Evaluador único: el análisis ecográfico fue realizado por un único experto, sin validación cruzada por un segundo evaluador ciego, lo que reduce la reproducibilidad y puede generar sesgo de confirmación.

Ausencia de cegamiento: el evaluador probablemente conocía la dosis aplicada, lo que podría haber influido, de manera consciente o no, en la selección o la interpretación de las imágenes.

Degradación post mortem del tejido: el tejido tendinoso sufre cambios bioquímicos y estructurales tras la muerte, que podrían afectar la ecogenicidad o la respuesta a la corriente galvánica.

2.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con IBM SPSS Statistics v29.0 (IBM Corp., Armonk, NY, EE. UU.). Dada la naturaleza exploratoria del estudio y la disponibilidad de una sola medición por dosis y por punto temporal, el análisis se basó en un enfoque descriptivo y de ajuste de curvas, sin aplicar pruebas inferenciales.

En primer lugar, se representó gráficamente la evolución temporal del efecto electrolítico, cuantificado con la herramienta UZ eDose, para cada uno de los tres protocolos, con el fin de visualizar la dinámica y la variabilidad de la respuesta galvánica en el tiempo.

Se generaron múltiples gráficos de líneas, con el eje X representando los puntos temporales (con espaciado equidistante, independientemente del tiempo real en minutos) y el eje Y mostrando los valores cuantitativos de UZ eDose. Las tres dosis se incluyeron en una misma figura para facilitar la comparación visual. El tiempo aproximado en que el efecto electrolítico regresó a valores basales se estimó mediante análisis visual e interpolación lineal entre los puntos de datos más próximos a la línea base.

Debido a la ausencia de réplicas y al diseño exploratorio del estudio, los resultados se interpretaron de forma descriptiva, sin realizar comparaciones estadísticas inferenciales entre las dosis.

Posteriormente, se aplicaron modelos matemáticos para describir la dinámica temporal del efecto observado en cada dosis. Se utilizó el procedimiento de estimación de curvas de SPSS, segmentando los datos por dosis para generar modelos independientes en cada protocolo. Se exploraron distintos modelos de regresión —lineal, logarítmico, exponencial, cuadrático, cúbico, inverso y potencial— para identificar el mejor ajuste a la tendencia observada. Para cada modelo se registraron el coeficiente de determinación (R^2) y la significación estadística del ajuste. Los modelos con mayor poder explicativo (R^2 más alto) fueron seleccionados para la interpretación descriptiva.

3. Resultados

3.1 Evolución temporal del efecto electrolítico detectado por ecografía según la dosis

En la Tabla 1 se muestra la evolución cuantitativa del efecto electrolítico observado mediante la herramienta UZ eDose en los tres protocolos de aplicación. Los valores reflejan la magnitud del efecto de gasificación visualizado en la ecografía (a mayor puntuación, mayor respuesta galvánica debida a la presencia de gas de hidrógeno). En todos los grupos, el valor previo al tratamiento (0,64) corresponde a la ecogenicidad basal del tendón antes de aplicar la electrólisis. Las mediciones posteriores ilustran cómo cada protocolo indujo patrones diferentes de cambio ecogénico a lo largo del tiempo.

Tabla 1. Evolución temporal del efecto electrolítico (valores de UZ eDose) para cada protocolo de dosis.

	Pre	Post												
Tiempo	Inmediato	30"	1'	2'	3'	4'	5'	10'	20'	30'	1h	6h	12h	24h
Dosis A	0.64	2.31	3.59	3.57	2.42	4.57	3.77	2.64	4.84	5.6	2.22	1.96	0.64	0.64
Dosis B	0.64	0.36	1.09	0.53	0.39	-1.55	1.96	3.53	0.34	0.41	4.24	4.42	0.64	0.64
Dosis C	0.64	3.62	3.74	2.74	5.13	2.32	3.29	1.43	0.31	8.5	-0.85	3.11	5.25	3.02

Valores cuantitativos obtenidos con la herramienta UZ eDose. Los valores más altos indican un mayor cambio ecogénico, lo que es consistente con una mayor gasificación. El valor “Pre” refleja la ecogenicidad basal sin electrólisis. Dosis A, protocolo 3x3x3. Dosis B, combinó el protocolo estándar 3x3x3 con un baño posterior utilizando tres agujas, aplicando una corriente continua de 1 mA hasta alcanzar una energía total de 1000 mJ. Dosis C, consistió exclusivamente en el protocolo de baño con tres agujas a 1 mA, aplicado hasta alcanzar una energía acumulada de 14 000 mJ, sin la aplicación estándar inicial.

Dosis A (3×3×3): Mostró un aumento gradual, con un pico máximo a los 20 minutos (5,60), seguido de un retorno progresivo hacia la línea de base entre las 6 y las 12 horas. El valor basal fue 0,64. Tras la aplicación, se observó un incremento progresivo del efecto galvánico, con un ascenso marcado desde los primeros minutos y un máximo a los 20 minutos. Posteriormente se detectó un descenso sostenido, regresando a valores cercanos al basal en torno a los 360 minutos (6 h), y permaneciendo estable desde entonces.

Dosis B: Presentó respuestas más variables e incluso valores negativos, aunque también volvió a la línea base hacia las 6 horas. El valor previo fue 0,64. A diferencia de la Dosis A, la evolución temporal mostró una gran variabilidad, incluyendo un valor negativo en el minuto 3 (-1,55). Se observaron picos de efecto a los 5 minutos (3,53) y a los 60 minutos (4,42), sin una tendencia sostenida. Finalmente, al igual que en la Dosis A, los valores retornaron a 0,64 a las 6 horas y se mantuvieron estables después.

Dosis C: (Alta carga acumulada mediante baño prolongado con tres agujas) produjo los cambios más elevados y persistentes, con un pico a los 20 minutos (8,50), alteraciones sostenidas hasta las 12 horas y sin normalización completa a las 24 horas. El valor basal fue 0,64. Tras la aplicación, el efecto galvánico fue más intenso, pero menos predecible: hubo un aumento pronunciado, con un pico máximo a los 20 minutos, pero con gran irregularidad posterior, incluyendo valores negativos a los 30 minutos (-0,85) y a las 24 horas (-1,79). No se observó un retorno consistente a los valores iniciales, y se mantuvo una amplia variabilidad durante todo el seguimiento. En resumen, la Dosis C no mostró una recuperación estable, evidenciando oscilaciones marcadas y valores negativos incluso al final del periodo de observación.

3.2 Ajuste del modelo y análisis de la evolución temporal del grado de electrólisis para cada dosis

La Figura 2 muestra los valores individuales obtenidos con la herramienta UZ eDose para los tres protocolos de aplicación, sin ajuste de modelos, a fin de visualizar la dispersión y variabilidad de las mediciones. Dado que solo se dispone de una medición por punto temporal, los resultados se interpretan de forma descriptiva y sirven para comparar visualmente las dinámicas temporales entre dosis. Dosis A: mayor concentración de valores altos, especialmente durante los primeros 20–30 minutos, seguida de un descenso evidente a partir del minuto 60. Dosis B: valores más dispersos, con marcadas fluctuaciones y puntuaciones negativas en ciertos momentos, lo que refleja una evolución más irregular. Dosis C: los valores más extremos, incluidos picos altos (por encima de 8) y valores negativos, sin un patrón claro de descenso sostenido, lo que indica una mayor variabilidad.

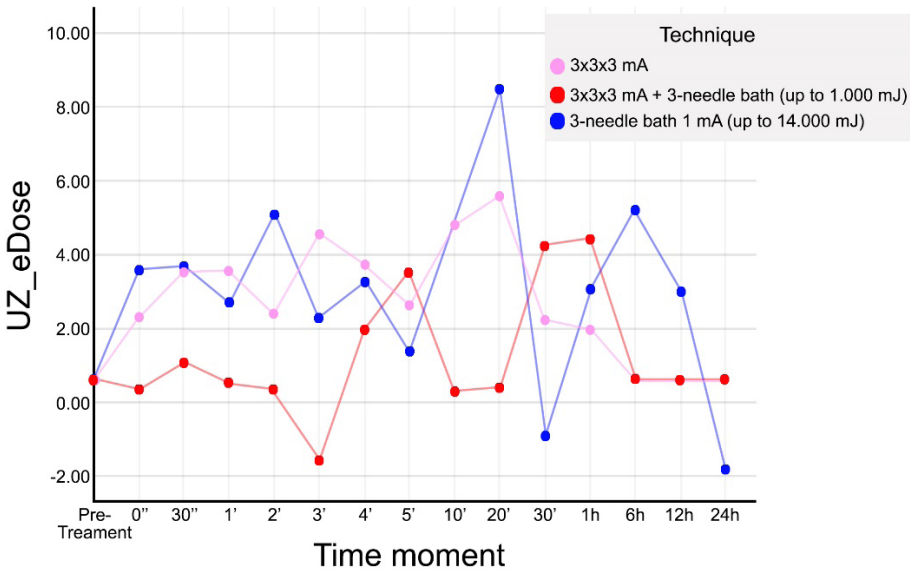


Figura 2. Dispersión de los valores cuantitativos de electrólisis (UZ eDose) para cada dosis en los distintos momentos de registro. Representación gráfica de las puntuaciones cuantitativas obtenidas con la herramienta UZ eDose en los distintos momentos posteriores al tratamiento para las tres dosis evaluadas.

3.3 Dosis A: ajuste del modelo y análisis

El primer protocolo (Dosis A) mostró un patrón curvilíneo, con incremento progresivo de los valores UZ eDose hasta alcanzar un pico en torno al cuarto minuto, seguido de un retorno gradual hacia los valores basales. Se realizó un análisis de ajuste de modelos para describir la evolución temporal de los cambios ecográficos inducidos por la Dosis A (ver Tabla 2). De los modelos evaluados (lineal, logarítmico, exponencial, cuadrático y cúbico), el cuadrático presentó el mejor ajuste, con un $R^2 = 0,641$ y significación estadística ($p = 0,002$). Esto sugiere que la respuesta ecogénica evoluciona de manera no lineal, siguiendo una trayectoria caracterizada por un aumento inicial y un descenso posterior. El modelo cúbico también mostró un buen ajuste ($R^2 = 0,648$), aunque su interpretación resulta más compleja debido al mayor número de parámetros implicados.

Tabla 2. Ajuste de distintos modelos de regresión para describir la evolución temporal de los cambios ecográficos tras la Dosis A.

Modelo	R ²	p-valor
Lineal	0.079	0.311
Logarítmico	0.000	0.953
Cuadrático	0.641	0.002
Cúbico	0.648	0.008
Exponencial	0.134	0.179

3.4 Dosis B: ajuste del modelo y análisis

La segunda aplicación (Dosis B) mostró una mayor variabilidad, con valores que permanecieron próximos a la línea de base durante la mayor parte del seguimiento. Al igual que en la dosis anterior, se aplicaron varios modelos de regresión para describir su evolución (ver Tabla 3). Debido a la presencia de valores negativos en las mediciones, los modelos que requieren

valores estrictamente positivos (exponencial, logarítmico, potencial, compuesto y logístico) no pudieron calcularse. Entre los modelos disponibles, el modelo cúbico presentó el mejor ajuste ($R^2 = 0,284$), aunque no fue significativo ($p = 0,280$). El modelo cuadrático mostró un ajuste menor ($R^2 = 0,121$, $p = 0,461$), similar al lineal ($R^2 = 0,079$) y al inverso ($R^2 = 0,047$). Estos resultados indican que la evolución temporal de la variable ecográfica en la Dosis B fue más irregular y menos definida que en la Dosis A, sin una tendencia curvilínea clara. El modelo exponencial no se pudo calcular debido a la presencia de valores negativos en el conjunto de datos, lo que es incompatible con este tipo de análisis de regresión.

Tabla 3. Ajuste de modelos de regresión para la evolución temporal de los cambios ecográficos en la Dosis B.

Modelo	R ²	p-valor
Lineal	0.079	0.310
Logarítmico	0.081	0.305
Inverso	0.047	0.440
Cuadrático	0.121	0.461
Cúbico	0.284	0.280
Exponencial	No calculado	—

3.5 Dosis C: ajuste del modelo y análisis

La Dosis C también mostró un comportamiento irregular, con fluctuaciones a lo largo del tiempo. Se aplicó el mismo procedimiento de ajuste de curvas para analizar la evolución temporal de la variable ecográfica tras la aplicación del tercer protocolo (ver Tabla 4). La presencia de valores negativos impidió calcular modelos exponenciales, logarítmicos, potenciales y logísticos. Ninguno de los modelos disponibles ofreció un ajuste adecuado para describir la evolución de esta dosis. El modelo cuadrático obtuvo un $R^2 = 0,090$ y el cúbico, $R^2 = 0,097$, ambos sin significación estadística ($p > 0,05$). Los modelos lineal e inverso también mostraron un ajuste bajo ($R^2 = 0,016$ y $0,011$, respectivamente). Estos hallazgos indican que la evolución temporal observada en la Dosis C no presenta un patrón curvilíneo claro ni consistente, lo que refleja una mayor variabilidad o dispersión en las mediciones ecográficas a lo largo del tiempo. El modelo exponencial no se pudo calcular debido a la presencia de valores negativos en el conjunto de datos, lo que es incompatible con este tipo de análisis de regresión.

Tabla 4. Ajuste de distintos modelos de regresión para describir la evolución temporal del grado de electrólisis en la Dosis C.

Modelo	R ²	p valor
Lineal	0.016	0.658
Logarítmico	0.000	0.948
Inverso	0.011	0.707
Cuadrático	0.090	0.569
Cúbico	0.097	0.761
Exponencial	No calculado	—

4. Discusión

Este estudio investigó la evolución temporal del efecto detectable por ecografía tras la aplicación de electrólisis percutánea en el tendón rotuliano de cadáveres, utilizando la herramienta cuantitativa UZ eDose. Los tres protocolos analizados mostraron comportamientos distintos: la Dosis A presentó un patrón más estable y predecible, con un aumento progresivo seguido de un retorno sostenido a los valores basales aproximadamente seis horas después del tratamiento. La Dosis B mostró una mayor variabilidad, pero también volvió a valores cercanos al nivel basal en un tiempo similar. En cambio, la Dosis C evidenció una respuesta más irregular, con picos más altos, mayor dispersión y ausencia de un retorno consistente a la línea basal en los tiempos de seguimiento más prolongados.

Las diferencias observadas entre los protocolos pueden atribuirse a las características específicas de cada aplicación de electrólisis percutánea. La Dosis A, basada en el protocolo clásico 3×3×3, provocó una respuesta más controlada y transitoria, probablemente debido a la brevedad de los impulsos y a su intensidad moderada, lo que tiende a inducir un efecto galvánico localizado y manejable. Desde un punto de vista fisiológico, esta respuesta concuerda con la literatura previa, que indica que las corrientes galvánicas de intensidad moderada pueden generar una reacción inflamatoria controlada que favorece la reparación tisular sin sobrecargar las estructuras circundantes⁽²⁻⁷⁾. La Dosis B, que combinó el protocolo estándar con un baño galvánico de baja intensidad (1 mA hasta 1.000 mJ), produjo una mayor variabilidad. Esto podría explicarse por un efecto acumulativo, en el que la inflamación inicial se amplifica debido a la formación adicional de gas y a las alteraciones del pH derivadas del baño de baja intensidad. A nivel químico, la electrólisis genera iones hidroxilo ($\text{OH}^{(-)}$) y gas hidrógeno (H_2) en el cátodo, y protones (H^+) y oxígeno (O_2) en el ánodo, lo que ocasiona cambios de pH y la formación de microburbujas gaseosas dentro del tejido⁽¹⁸⁾. Estas microburbujas son visibles mediante ecografía y constituyen un marcador directo del efecto electrolítico⁽⁷⁾; sin embargo, su acumulación excesiva puede interferir con el retorno a la línea de base y con la cuantificación del efecto. En el caso de la Dosis C, que consistió únicamente en un baño prolongado de alta dosis (14.000 mJ), se observó un patrón errático y la ausencia de retorno a los valores iniciales durante el periodo de observación. Esto podría reflejar una saturación tisular y una difusión extensa de los productos electroquímicos, lo que dificultaría su reabsorción y estabilización. Estudios previos han sugerido que, más allá de cierto umbral, el efecto electrolítico puede llegar a ser tan intenso que compromete la visibilidad ecográfica debido a la gasificación excesiva, especialmente cuando se combinan tiempos de aplicación prolongados con intensidades elevadas^(7,17). Este hallazgo refuerza la idea de que no solo la dosis total (mC), sino también la forma en que se administra (la interacción entre tiempo e intensidad) desempeñan un papel decisivo en la magnitud y el comportamiento de la respuesta tisular⁽⁸⁾. Además, algunos autores han reportado que el tiempo de aplicación, por sí solo, puede influir de manera significativa mientras la visibilidad ecográfica se mantiene adecuada, perdiendo relevancia cuando la formación excesiva de gas impide la evaluación⁽⁷⁾. Esto coincide con los resultados del presente trabajo, en el que la Dosis C parece haber superado dicho umbral, generando saturación tisular y pérdida de estabilidad de la señal cuantificable.

Hasta donde alcanza nuestro conocimiento, este es uno de los primeros estudios que monitorea de forma objetiva y cuantitativa la evolución temporal del efecto ecográfico inducido por electrólisis percutánea, empleando una herramienta específica como UZ eDose. Mientras que investigaciones previas habían ofrecido descripciones cualitativas o fisiológicas de la respuesta tisular, pocas se habían centrado en el comportamiento temporal del efecto ni en su modulación según distintos protocolos de dosis⁽²⁻⁷⁾. En un análisis reciente, la intensidad emergió como el parámetro más relevante para explicar la magnitud de la respuesta ecográfica, seguido del tiempo de aplicación, siempre que la visibilidad se mantuviera adecuada⁽⁷⁾. Nuestros resultados amplían estos hallazgos al mostrar que la persistencia temporal del efecto galvánico también varía en función del tipo de protocolo, no solo en magnitud, sino también en la dinámica de resolución. Esto concuerda con resultados experimentales previos en células, donde se observaron diferencias en marcadores biológicos (como IL-1 β o LDH) pese a aplicarse la misma carga eléctrica total, lo que sugiere que la intensidad y el tiempo no son variables intercambiables⁽⁸⁾. Nuestros datos apoyan, además, el concepto de un umbral de saturación, más allá del cual el efecto electrolítico se vuelve excesivo y persistente. En la Dosis C, esto podría explicar la falta de retorno a la línea de base durante el periodo de seguimiento. Este hallazgo resalta la importancia de personalizar los parámetros de electrólisis no solo según la intensidad y duración, sino también considerando su interacción y los efectos acumulativos a lo largo del tiempo. De forma significativa, estos puntos de saturación pueden dificultar la propia monitorización ecográfica, lo que subraya la necesidad de definir límites máximos de seguridad que garanticen una evaluación fiable^(7,17).

Mediante la integración de una cuantificación temporal y el uso de la herramienta UZ eDose para monitorizar el retorno a la línea de base, este estudio aporta una nueva perspectiva sobre el comportamiento de “lavado” (washout) del efecto electrolítico, un aspecto poco explorado en investigaciones previas. Esto podría tener implicaciones clínicas relevantes, tanto para guiar los intervalos entre sesiones de tratamiento como para ajustar las estrategias de dosificación. Comprender el tiempo aproximado de desaparición o retorno a la línea de base tras la electrólisis podría ser fundamental para optimizar la frecuencia de tratamiento y adaptar los protocolos a la respuesta individual de cada paciente. La herramienta UZ eDose podría, además, permitir la monitorización en tiempo real del efecto galvánico, facilitando la toma de decisiones personalizadas basadas en datos objetivos. Los principales puntos fuertes de este estudio incluyen el uso de una herramienta cuantitativa validada (UZ eDose) y un diseño experimental estandarizado en tejido cadavérico, lo que permitió un control preciso de los parámetros de aplicación y de las mediciones temporales. Asimismo, los resultados contribuyen a comprender el comportamiento del efecto gaseoso a distintos tipos de dosis, mostrando que este no es proporcional al producto de intensidad $\times$ tiempo ni a la energía eléctrica acumulada, sino que sugiere un comportamiento más complejo y no lineal, que aún no comprendemos por completo. No obstante, este trabajo presenta varias limitaciones que deben reconocerse, entre las que destacan la ausencia de réplicas experimentales por dosis y punto temporal, lo que impide realizar análisis inferenciales sólidos y limita la generalización de los resultados, ya que cada protocolo se aplicó únicamente una vez por intervalo, restringiendo la estimación de la variabilidad interna y confinando el análisis a un nivel descriptivo y exploratorio. Además, el modelo in vitro con tendón rotuliano cadavérico, si bien permite un alto control de los paráme-

tros de aplicación, no reproduce la complejidad de las respuestas biológicas in vivo, dado que mecanismos fisiológicos esenciales como la inflamación, el metabolismo celular o la perfusión tisular —fundamentales para los procesos regenerativos inducidos por la electrólisis— están ausentes en este contexto. Finalmente, la heterogeneidad post mortem del tejido y las posibles alteraciones derivadas de las condiciones de almacenamiento (temperatura, hidratación o presión) podrían haber influido en el comportamiento de la señal ecográfica y en la evolución del efecto galvánico observado. Futuras investigaciones deberían incluir un mayor número de muestras, evaluaciones repetidas y estudios con diferentes tipos de tejido e incluso modelos in vivo. Validar la herramienta UZ eDose para su uso clínico podría abrir nuevas vías hacia una monitorización individualizada y optimizada de las intervenciones basadas en la electrólisis. Asimismo, explorar la interacción entre los parámetros de aplicación (intensidad, duración, frecuencia de impulsos) y la persistencia de los cambios ecográficos detectables podría mejorar nuestra comprensión mecanicista de la técnica.

5. Conclusiones

Este estudio in vitro ofrece una descripción cuantitativa de la evolución temporal de los cambios visibles por ecografía inducidos por la electrólisis percutánea en el tendón rotuliano cadavérico. Entre los tres protocolos evaluados, las dosis A y B mostraron un retorno a valores próximos a la línea de base aproximadamente seis horas después del tratamiento, mientras que la dosis C presentó una mayor dispersión y careció de un patrón de estabilización consistente. Estos hallazgos sugieren que el perfil temporal de los efectos de la electrólisis depende de la estrategia de dosificación empleada. Aunque prometedores, los resultados deben interpretarse con cautela debido al tamaño muestral limitado, la ausencia de replicación y las restricciones inherentes a un modelo in vitro. Aun así, la herramienta UZ eDose resulta un recurso valioso para monitorizar y cuantificar los efectos ecográficos de la electrólisis percutánea. Una validación adicional y su aplicación clínica podrían contribuir al desarrollo de protocolos de electrólisis más personalizados y basados en la evidencia en la práctica musculoesquelética.

Referencias

1. Calderón-Díez L, Belón-Pérez P, Fernández-de-las-Peñas C, Sánchez-Sánchez JL. The Safety of Ultrasound-Guided Needle Approaches for Patellar Tendinopathy: A Theoretical Cadaveric Model. *J Funct Morphol Kinesiol*. 2025 Jun 3;10(2):208. doi: [10.3390/jfmk10020208](https://doi.org/10.3390/jfmk10020208)
2. Rodríguez-Sanz J, Rodríguez-Rodríguez S, López-de-Celis C, Malo-Urriés M, Pérez-Amodio S, Pérez-Antoñanzas R, et al. Biological and Cellular Effects of Percutaneous Electrolysis: A Systematic Review. *Biomedicines*. 2024 Dec 1;12(12). doi: [10.3390/biomedicines12122818](https://doi.org/10.3390/biomedicines12122818)
3. Peñin-Franch A, García-Vidal JA, Martínez CM, Escolar-Reina P, Martínez-Ojeda RM, Gómez AI, et al. Galvanic current activates the NLRP3 inflammasome to promote type I collagen production in tendon. *Elife*. 2022;1–23. doi: [10.7554/eLife.73675](https://doi.org/10.7554/eLife.73675).
4. Sánchez-sánchez JL, Calderón-díez L, Herrero-turrión J, Méndez-sánchez R, Arias-buría JL, Fernández-de-las-peñas C. Changes in Gene Expression Associated with Collagen Regeneration and Remodeling of Extracellular Matrix after Percutaneous Electrolysis on Collagenase-Induced Achilles Tendinopa-

thy in an Experimental Animal Model: A Pilot Study. *J Clin Med*. 2020 Oct 1;9(10):1–17. doi: [10.3390/jcm9103316](https://doi.org/10.3390/jcm9103316).

5. Ramos-Barbero M, Pérez-Jiménez A, Serrano-Carmona S, Mokhtari K, Lupiáñez JA, Rufino-Palomares EE. The Efficacy of Intratissue Percutaneous Electrolysis (EPI®) and Nutritional Factors for the Treatment of Induced Tendinopathy in Wistar Rats: Hepatic Intermediary Metabolism Effects. *Int J Mol Sci*. 2024 Jul 1;25(13). doi: [10.3390/ijms25137315](https://doi.org/10.3390/ijms25137315).

6. Abat F, Valles SL, Gelber PE, Polidori F, Stitik TP, García-Herreros S, et al. [Molecular repair mechanisms using the Intratissue Percutaneous Electrolysis technique in patellar tendonitis]. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol*. 2014;58(4):201–5. doi: [10.1016/j.recot.2014.01.002](https://doi.org/10.1016/j.recot.2014.01.002).

7. Malo-Urriés M, Rodríguez-Sanz J, Borrella-Andrés S, Ríos-Asín I, Albarova-Corral I, López-de-Celis C. Quantitative Ultrasound Characterization of Intensity-Dependent Changes in Muscle Tissue During Percutaneous Electrolysis. *J Clin Med*. 2025 Jun 9;14(12):4064. doi: [10.3390/jcm14124064](https://doi.org/10.3390/jcm14124064)

8. Peñín-Franch A, García-Vidal JA, Gómez AI, Escolar-Reina P, Medina-Mirapeix F, Pelegrín P. The total electric charge and time of application of galvanic currents to macrophages can optimize the release of IL-1 β with low cell death. *Sci Rep*. 2024 Dec 1;14(1). doi: [10.1038/s41598-024-81848-3](https://doi.org/10.1038/s41598-024-81848-3).

9. Sánchez-González JL, Navarro-López V, Cañada-Sánchez P, Juárez-Vela R, Viñaspre-Hernández RR de, Varela-Rodríguez S. Efficacy of different intensities of percutaneous electrolysis for musculoskeletal pain: A systematic review and meta-analysis. *Front Med (Lausanne)*. 2023 Feb 2;10. doi: [10.3389/fmed.2023.1101447](https://doi.org/10.3389/fmed.2023.1101447)

10. Silva ACT da, Kamonseki DH, Azevedo LMV de, Araújo JN de, Magalhães GC, Oliveira VMA de. Effect of percutaneous electrolysis on pain and disability in individuals with tendinopathy: Systematic review and meta-analysis. *J Bodyw Mov Ther*. 2024 Oct 1;40:640–9. Doi: [10.1016/j.jbmt.2024.05.030](https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2024.05.030)

11. Ferreira MHL, Araujo GAS, De-La-Cruz-Torrez B. Effectiveness of Percutaneous Needle Electrolysis to Reduce Pain in Tendinopathies: A Systematic Review With Meta-Analysis. *J Sport Rehabil*. 2024 Jul 1;33(5):307–16. doi: [10.1123/jsr.2024-0009](https://doi.org/10.1123/jsr.2024-0009).

12. Doménech-García V, Pecos-Martín D, Blasco-Abadía J, Bellosta-López P, López-Royo MP. Placebo and nocebo effects of percutaneous needle electrolysis and dry-needling: an intra and inter-treatment sessions analysis of a three-arm randomized double-blinded controlled trial in patients with patellar tendinopathy. *Front Med (Lausanne)*. 2024;11. doi: [10.3389/fmed.2024.1381515](https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1381515).

13. Carvajal, O; Alvarez, D; Medina, F; Minaya F. Effects of percutaneous needle electrolysis of the patellar tendon on local and contralateral temperature, measured with infrared thermography. *Rev Fisioter Invasiva*. 2016;1(1):18–25. <https://www.elsevier.es/es>

14. Abat F, Diesel WJ, Gelber PE, Polidori F, Monllau JC, Sanchez-Ibañez JM. Effectiveness of the Intratissue Percutaneous Electrolysis (EPI®) technique and isoinertial eccentric exercise in the treatment of patellar tendinopathy at two years follow-up. *Muscles Ligaments Tendons J* [Internet]. 2014 [cited 2022 Jun 26];4(2):188–93. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25332934/> PMID: [PMCID: PMC4187605](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25332934/)

15. Valera-Garrido F, Minaya-Muñoz F, Medina-Mirapeix F. Ultrasound-guided percutaneous needle electrolysis in chronic lateral epicondylitis: Short-term and long-term results. *Acupuncture in Medicine*. 2014;32(6):446–54. doi: [10.1136/acupmed-2014-010619](https://doi.org/10.1136/acupmed-2014-010619).

16. Albarova-Corral I, Segovia-Burillo J, Malo-Urriés M, Ríos-Asín I, Asín J, Castillo-Mateo J, et al. A New Quantitative Tool for the Ultrasonographic Assessment of Tendons: A Reliability and Validity Study on the Patellar Tendon. *Diagnostics*. 2024 Jun 1;14(11). doi: [10.3390/diagnostics14111067](https://doi.org/10.3390/diagnostics14111067).

17. Malo-Urriés M, Rodríguez-Sanz J, Borrella-Andrés S, Albarova-Corral I, Martínez-Zamorano JC, López-de-Celis C. Exploring Intensity-Dependent Echogenic Response to Percutaneous Electrolysis in Tendon Tissue: A Cadaveric Study. J Clin Med [Internet]. 2025 Jul 6 [cited 2025 Jul 28];14(13):4772. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40649146/> doi.org/10.3390/jcm14134772

18. Borrella-Andrés S, Malo-Urriés M, Pérez-Bellmunt A, Arias-Burúa JL, Rodríguez-Sanz J, Albarova-Corral MI, et al. Application of Percutaneous Needle Electrolysis Does Not Elicit Temperature Changes: An In Vitro Cadaveric Study. Int J Environ Res Public Health. 2022 Dec 1;19(23). doi: 10.3390/ijerph192315738.

Información editorial

✉ Correspondencia

jrodriguezs@uic.es

Fechas

Recibido: 18.09.2025

Aceptado: 19.10.2025

Publicado: 21.11.2025

Contribuciones de autoría

La conceptualización fue realizada por M.M.-U., J.R.-S. y S.B.-A.; la metodología por M.M.-U., J.R.-S. y S.B.-A.; el análisis formal por M.M.-U. y C.L.-d.-C.; la investigación por M.M.-U., J.R.-S., S.B.-A., I.R.-A., C.L.-d.-C. e I.A.-C.; la curación de datos por M.M.-U.; la redacción del borrador original por M.M.-U. y J.R.-S.; la redacción, revisión y edición por todos los autores; y la supervisión por M.M.-U. y J.R.-S. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Declaración del Comité de Ética Institucional:

El estudio se realizó de acuerdo con los principios de la Declaración de Helsinki y fue aprobado por el Comité de Ética Local de la Universitat Internacional de Catalunya con el número CBAS-2023-11 (Fecha: 27 de octubre de 2023).

Declaración de Consentimiento Informado:

Las muestras proceden de donantes anatómicos del laboratorio de anatomía de la Universitat Internacional de Catalunya (España). Los participantes en este estudio firmaron un consentimiento escrito para donar su cuerpo con fines de investigación.

Agradecimientos:

Los autores expresan su agradecimiento a los donantes de cuerpo que hacen posible el estudio de la anatomía.

Financiación

Esta investigación no recibió financiación externa.

Declaración de Disponibilidad de Datos

Los datos brutos en los que se basan los resultados del estudio se podrán obtener tras solicitud al autor de correspondencia.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Cita sugerida

Malo-Urriés M, Rodríguez-Sanz J, Borrella-Andrés S, Albarova-Corral I, Ríos-Asín I, López-de-Celis C. Cuantificación de la resolución temporal de los cambios ecográficos inducidos por gas tras la electrólisis percutánea en tejido tendinoso. Estudio cadavérico. Invasive Physiother Musculoskelet Med. 2025;1:e17. doi: 10.63360/ipmm.v1.e17

Descargo de responsabilidad/Nota del Editor

Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente del o los autores individuales y contribuyentes, y no de IPMM y/o del o los editores. IPMM y/o el o los editores rechazan toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedades que resulte de ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.

Copyright

© 2025 Las/os Autoras/es.

Publicado bajo licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA)

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>).