



BIOIMPEDANCIA ELÉCTRICA Y CÁNCER DE PULMÓN

Autor: Yorkiel Castellanos Bertot ¹

¹ Instructor. Instituto de Neurología y Neurocirugía. La Habana. Cuba

RESUMEN

Introducción: en los pacientes con cáncer se sabe que el estado nutricional está comprometido y que se asocia a resultados adversos. En este sentido, la bioimpedancia eléctrica, como medidor de la composición corporal, está validada para evaluar la composición corporal y el estado nutricional de los pacientes con cáncer. **Desarrollo:** Hansen et al. llevaron a cabo un estudio para explorar el acuerdo entre la evaluación de la BIA de la composición corporal y el análisis de software de las tomografías computarizadas en pacientes con CP de células no pequeñas. La conclusión del estudio indicó que ambos métodos no eran directamente comparables para las mediciones de la composición corporal. Además, se encontró que BIA sobreestimó al valor de la masa grasa. En otro estudio, Kovarik et al. proporcionaron un resumen de evidencia reciente sobre diversos métodos, incluyendo BIA, para evaluar los cambios en la composición corporal en pacientes con CP. El estudio subrayó la importancia de la BIA y el ángulo de fase derivado de BIA en la predicción de los resultados para los pacientes con cáncer de pulmón. **Conclusiones:** los resultados de los estudios mencionados muestran que la bioimpedancia, tanto el análisis de bioimpedancia eléctrica como espectroscopia por bioimpedancia eléctrica, son de gran impacto para el estudio del cáncer de pulmón y tienen un alto potencial para el desarrollo de nuevas alternativas de detección temprana.

Palabras clave: cáncer de pulmón, bioimpedancia eléctrica, campo carcinogénico.

INTRODUCCIÓN

El análisis de la composición corporal consiste en el fraccionamiento de la masa corporal total en sus distintos componentes. Se ha utilizado el índice

de masa corporal (IMC), y la circunferencia de la cintura y la cadera o pliegues de grasa subcutánea para evaluar el estado nutricional de las personas, porque las medidas que intervienen son sencillas de tomar y son fáciles de calcular. Aunque son poco precisos en determinados casos, en particular para el diagnóstico clínico, ya que no distingue adiposidad de musculatura o tejido esquelético.(1)

La asociación entre el exceso de grasa corporal, el riesgo cardiovascular y el cáncer, en especial el pulmonar, ha acelerado en los últimos años el desarrollo de numerosas técnicas. El uso de algunas de estas técnicas se generaliza en la práctica clínica y algunas como el análisis de bioimpedancia o *bioimpedance analysis* (BIA) o la absorciometría dual de rayos X *dual energy X-ray absorptiometry (DEXA)*, se aplican en estudios poblacionales como son los Nacionales de Salud y Nutrición de Estados Unidos.(2)

El AF es un elemento del BIA que da como resultado el estado de la salud celular y el estado nutricional por medio de la resistencia de los fluidos corporales y la reactancia de la membrana celular. Mientras más alto sea el AF, representado con la unidad de medida "grados", mejor será la función de la membrana celular; por otro lado, un bajo AF estará estrechamente relacionado con la apoptosis de las células y la disminución de la matriz celular.(3) El AF también se asocia al pronóstico y la sobrevivencia de los pacientes con cáncer en cuidados paliativos.

En los pacientes con cáncer se sabe que el estado nutricional está comprometido y que se asocia a resultados adversos. En este sentido, la bioimpedancia eléctrica (BIA), como medidor de la composición corporal, está validada para evaluar la composición corporal y el estado nutricional de los pacientes con cáncer. La bioimpedancia vectorial eléctrica (BIVA) es el método más novedoso hoy en día que mide ángulo de fase (AF), que se considera como un marcador global de salud. Refleja la masa de células del cuerpo y es un excelente marcador de la función de la membrana celular. Se ha observado que la disminución de la integridad celular o la muerte celular están asociadas a un AF inferior, mientras que las membranas intactas corresponden con un valor de AF más alto.(4)



Por estas razones es de vital importancia el conocimiento de las modificaciones eléctricas en el organismo a expensas de la aparición de estas neoplasias. Problema científico: ¿Cuáles son las características bioeléctricas del paciente con cáncer de pulmón? El objetivo: de esta investigación es describir bioeléctricas del paciente con cáncer de pulmón.

DESARROLLO

La impedancia (Z), medida en ohmios, es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de R y Xc , es dependiente de la frecuencia y pueden incluir resistencia (R), reactancia inductiva (XL) y la reactancia capacitiva (XC), las reactancias capacitivas e inductivas están dadas por fórmulas, en función de la frecuencia en Hertz, la inductancia en Henrios y la capacitancia en Faradios, las cuales son variables físicas que se pueden medir. (5)

La resistencia (R) es la oposición de un conductor biológico al flujo de una corriente eléctrica alterna, mientras que Xc es el efecto de la resistencia debido a la capacitancia, almacenamiento de carga eléctrica en un condensador, producida por las interfaces de los tejidos y las membranas celulares. La capacitancia hace que la corriente deje atrás la tensión, donde crea un cambio de fase. Este cambio se cuantifica según la geometría como la transformación angular de la relación de la Xc a la R , o el ángulo de fase (AF). (6)

El AF se puede calcular solo de R y Xc como el arco tangente $(Xc/R) \times 180^\circ/\pi$. Por lo tanto, el AF, por una parte es dependiente de la capacitancia de los tejidos (Xc) asociado con la celularidad, tamaño de la célula e integridad de la membrana celular, y por otro lado, del comportamiento de la R , que depende solo de la hidratación de los tejidos.(7)

Impedancia bioeléctrica (BIA) y análisis vectorial (BIVA)

La BIVA, por otro lado, se basa en el cumplimiento del vector impedancia y en su ángulo de fase, medido en 50hz, pero es un método que puede ser influido por el error de medida de la impedancia y por la variabilidad fisiológica de los sujetos. Las variables de medida de la BIVA son la resistencia

(R) y la reactancia (Xc), que son las mismas de la BIA, pero a su vez son normalizadas por la altura y registradas como vectores en el plan R/Xc. El cumplimiento del vector establece el nivel de hidratación del sujeto, de manera que, cuanto mayor el vector, menor la cantidad de agua y mayor la resistencia (R), mientras que el mayor ángulo de fase está asociado al mejor estado nutricional. (8)

Esta técnica permite analizar la hidratación del paciente y distinguir los tejidos corporales con mayor contenido de agua (músculos) y aquellos con bajo contenido de agua (tejido adiposo, pulmón y huesos). La reactancia (Xc), por otro lado, determina la capacidad de las membranas celulares para almacenar energía, ya que actúan como condensadores eléctricos cuando una corriente eléctrica pasa a través de ellas. Estas actúan como conductores y el contenido celular ejerce como material dieléctrico, donde almacena la carga cuando la corriente pasa entre el compartimento intra y extracelular.(9)

El AF también se ha utilizado para predecir la masa celular corporal, por esta razón, también se utiliza como un indicador nutricional en adultos y niños. Se ha estudiado el papel del AF, como un indicador de pronóstico y este puede variar en diferentes condiciones clínicas. (10)

En la actualidad existe una gran cantidad de ensayos clínicos que proponen el AF como un marcador pronóstico útil en condiciones clínicas, como en cirrosis hepática, varios tipos de cáncer, esclerosis sistémicas, también se observó una asociación positiva entre el AF y la supervivencia en pacientes con VIH-positivos. Varios autores sugieren que el AF puede ser una herramienta importante para evaluar el resultado clínico o para evaluar la progresión de la enfermedad y este puede ser superior a otros indicadores nutricionales, bioquímicos o antropométricos.(11)

Principios y propiedades bioeléctricas del cuerpo humano

La resistencia es proporcional a la longitud del cuerpo (por lo general se considera su longitud o altura) e inversamente proporcional al área de sección (en general las medidas que representan los perímetros de los segmentos del



tronco y de las extremidades). Por ello, un cuerpo largo tendrá una mayor resistencia en relación con uno más corto, y un cuerpo con un área de sección pequeña tendrá una resistencia menor.

En matemática, el volumen del conductor puede estimarse con la ecuación: volumen del conductor: Volumen (V) = longitud (L) × área (A) A = V/L
(resistencia) R = p
(L/V) V = p L2/R

Donde p una constante de resistividad del cuerpo.(11,12)

Esta relación volumétrica asume que el conductor tiene una forma uniforme y que la corriente también se distribuye con uniformidad. La constante de resistividad del cuerpo (p) en ohm (Ω)/cm es independiente del tamaño y la forma, y es similar a la gravedad específica. Si se sustituye la longitud por la estatura, se obtiene el cociente del cuadrado de la estatura por la resistencia (estatura $2/R$), en cm^2/Ω , y este es el conocido índice de impedancia, que es proporcional al volumen corporal.¹ Este índice es de gran importancia, ya que se presenta en la mayoría de las ecuaciones de predicción, como la mayor y más importante variable predictora del ACT (agua total corporal).(13)

Los aparatos de impedancia eléctrica introducen en el cuerpo una corriente alterna de amperaje muy bajo (imperceptible), que discurre por el cuerpo al actuar el agua corporal como elemento conductor y la resistencia que ofrece el fluido al paso de esa corriente, es medida por el medidor de impedancia.

Los flujos eléctricos de corriente atraviesan de forma diferente tanto los líquidos extracelulares, como los intracelulares y son dependientes de la frecuencia de la corriente. En frecuencias de 5 Hz o menores, esta corriente fluye muy bien por el agua extracelular con una reactancia muy baja. Con frecuencias por encima de 100 Hz, la corriente penetra en los tejidos corporales también con una reactancia mínima.(14)

La constante de resistividad (p) no es igual en todos los segmentos del cuerpo humano y esto se debe a las variaciones intraindividuales e interindividuales de la composición de los diferentes tejidos, que en suma son parte de las diferencias interindividuales y de la existencia de errores de predicción en la

estimación de la composición corporal mediante BIA. El fundamento principal de la técnica de BIA es valorar la respuesta de los tejidos al paso de una corriente eléctrica de tipo alterno, que deberá ser de un voltaje muy bajo e indoloro para el humano.(15)

La corriente utilizada puede ser de dos tipos: monofrecuencia (50 kHz) o multifrecuencia. Ambas pueden medir el ACT, por lo tanto, la multifrecuencia puede discriminar y estimar el contenido hídrico y celular del cuerpo. Esto se debe a que la multifrecuencia permite atravesar las membranas celulares. (15)

Es de destacar que las mediciones pueden realizarse de cuerpo total, cuerpo parcial o segmental, esto depende de la ubicación de los electrodos negativos y positivos. En el caso de los pacientes con trastornos de la conducta alimentaria se pudiera emplear aquellos tipos de impedancia que evalúasen por completo el cuerpo de los pacientes, debido a los cambios corporales que suelen tener lugar en pacientes con anorexia nerviosa, bulimia nerviosa y obesidad (se considera al trastorno por atracción con complicaciones similares a la obesidad y el sobrepeso al consumir alimentos ricos en energía y grasas en los episodios de atracones).(16)

Por lo tanto se puede afirmar que, las corrientes multifrecuencia son capaces de atravesar las membranas celulares, de esta manera se considera el cuerpo humano como un cilindro de talla (L) y sección trasversal (A) se establece que: $Z = (p \times L)/A$. (16)

Piccoli A, et al, desarrollaron un nuevo método el cual no depende de modelos, estimaciones o ecuaciones, y que sólo se afecta por las medidas de Z o bien de la variabilidad individual. Se trata de la construcción de un gráfico R/H (abscisas) y Xc/H (ordenadas), estandarizado por edades. Cada vector individual puede ser comparado con las referencias de unas elipses que representan el 50, el 75 y el 95 % de tolerancia para cada edad y tamaño corporal.(17)

El movimiento del vector de impedancia puede variar (emigrar) a diferentes zonas que se interpretan como estados de deshidratación con largos vectores, hiperhidratación con vectores cortos y cambios a izquierda o derecha según cambios producidos en la MLG.(17)

Efecto de campo carcinogénico y su estudio en el cáncer de pulmón (CP)

La "cancerización de campo", también conocida como "efecto de campo carcinogénico" fue basada en la evidencia de la aparición de múltiples tumores primarios en la piel y en el tracto aerodigestivo. Hoy en día, los estudios basados en este concepto abarcan otros tipos de cáncer, incluyendo el CP.(18)

Este concepto está relacionado con el desarrollo de cambios en la estructura del tejido, predominantemente de tipo epigenético, en áreas relativamente extensas de un órgano, que pueden conducir a la predisposición para el desarrollo de tumores y posteriormente desencadenar un cáncer. Esta teoría plantea que dichos cambios son progresivos en el tiempo y se generan por la exposición crónica a factores o agentes carcinogénicos, como el consumo de tabaco, la exposición a los rayos UV y a otros agentes químicos. Esta exposición prolongada conduce al desarrollo de alteraciones que pasan inadvertidas antes de la aparición de lesiones, es decir, antes de que se presenten evidencias fenotípicas, tales como lesiones premalignas, displasia y posteriormente el carcinoma in situ. Adicionalmente, la manifestación extendida espacialmente en un órgano o en todo el organismo y su prolongación en el tiempo, podría explicar la aparición de tumores sincrónicos, los cuales son recurrentes, de mal pronóstico y con baja efectividad ante tratamientos como la resección y la radioterapia.(19)

Con miras a demostrar la cancerización de campo para su aplicación en tamización, diagnóstico y tratamiento, se han llevado a cabo investigaciones de técnicas ópticas, las cuales se han centrado en la detección de cambios ultraestructurales a nivel celular, siguiendo una estrategia de evaluación de tejido tumoral, tejido adyacente, no adyacente y sano. Los cambios



ultraestructurales se definen como aquellos que se encuentran por debajo de la capacidad de resolución de un microscopio óptico convencional, el cual está limitado, en el mejor de los casos, a los 200 nm. Es decir, que dichos cambios son de orden nanoscópico y están relacionados con la arquitectura intracelular, por lo cual su detección podría revelar distintas alteraciones de tipo epigenético que ocurren en la célula durante el proceso de evolución del cáncer, incluyendo las fases iniciales, en las cuales no se presentan aún cambios microscópicos. (20)

Para detectar estas ultraestructuras se utilizan técnicas de dispersión, retrodispersión y de reflectancia de la luz con el fin de reconstruir imágenes basadas en patrones de intensidad. Entre las técnicas que se han desarrollado y utilizado para la investigación de la cancerización de campo en CP se encuentran la espectroscopia de onda parcial (PWS, por sus siglas en inglés) , la tomografía de espectroscopia óptica inversa (ISOCT, por sus siglas en inglés), la retrodispersión de baja coherencia mejorada (LEBS, por sus siglas en inglés) y la espectroscopia activada por polarización. Los niveles de resolución de estas técnicas permiten observar cambios en las organelas, como el citoesqueleto, los ribosomas, la mitocondria, la estructura de la cromatina, complejos macromoleculares y separación intercelular. También cabe destacar la técnica de espectroscopia de masas de imágenes de ionización y desorción asistida por matriz (MALDI-MSI, por sus siglas en inglés), que, sin ser una técnica óptica, ha sido utilizada para el estudio del campo de cancerización en CP.(20)

Bioimpedancia eléctrica en el estudio del cáncer de pulmón

La BIA es una técnica que permite la medición de la impedancia eléctrica de un tejido biológico, mediante la aplicación de una corriente eléctrica alterna, de baja intensidad y la medición de su respuesta en voltaje, ya sea en una o en varias frecuencias. (21)

Respecto al CP, se han llevado a cabo un gran número de investigaciones relacionadas con BIA, en su gran mayoría con la evaluación del estado nutricional de personas que padecen la enfermedad, ya que mediante esta técnica es posible determinar la masa grasa, la masa libre de grasa, el agua corporal total, el agua extracelular y el agua intracelular, así como también

el ángulo de fase, los cuales dependen de las propiedades eléctricas y de la estructura del organismo, de su composición, del estado de maduración, de su nivel de hidratación, de la edad, del sexo, de la raza y la condición física, y pueden estar relacionados con la respuesta del paciente ante la enfermedad. Adicionalmente, hay evidencia de que el hábito de fumar, que trae consigo modificaciones de la distribución del tejido adiposo del organismo, especialmente la acumulación de grasa abdominal, es un factor de riesgo para el desarrollo del CP, lo cual ha sido evaluado mediante el uso de esta técnica.(21)

En cuanto al ángulo de fase (ϕ), se ha encontrado que es un marcador pronóstico en varias condiciones clínicas: la infección por el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH), la cirrosis hepática, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica, la hemodiálisis, la sepsis, el cáncer de pulmón, el cáncer colorrectal, el cáncer de páncreas y el cáncer de mama. (22)

Específicamente en CP algunos artículos han evaluado el pronóstico de supervivencia mediante la medición del ángulo de fase. En ellos se han establecido umbrales cercanos a 5° , teniendo que para valores menores al umbral el pronóstico de supervivencia es bastante bajo y para valores mayores mejora notablemente. De hecho, Gupta et al. reportaron una media de 8 meses de vida en pacientes con ángulos menores a $5,7^\circ$ y de 40 meses para ángulos mayores a dicho umbral. (23)

Por otra parte, se ha evaluado la correlación del mencionado ángulo con el estado nutricional, el cual se ha asociado a complicaciones y mal pronóstico de pacientes sometidos a cirugías, se ha establecido su correlación con el estado muscular en pacientes con CP y, recientemente, se ha podido determinar que este parámetro es sensible a la variación de aspectos clínicos como la edad, el tiempo de estancia hospitalaria, la gravedad de las complicaciones y la quimiotoxicidad.(23)

Respecto a la caracterización eléctrica del tejido del pulmón, son pocos los estudios reportados, y en su mayoría se han llevado a cabo en muestras de tejido ex vivo y en modelos animales. Efectivamente, en la búsqueda realizada en esta revisión, solo se encontraron documentadas dos investigaciones que han llevado a cabo mediciones de BIA in vivo sobre tejido pulmonar en humanos. Entre las investigaciones realizadas ex vivo y en

modelo animal, en 1987 se informó el estudio de la resistencia transepitelial en tejido de colon de ratones, mediante la medición de impedancia. Allí se logró identificar la disminución de la resistencia en función del tiempo de exposición a un agente cancerígeno, detectando incluso variaciones en este parámetro antes de que se evidenciaran alteraciones por microscopía electrónica y óptica. Posteriormente, en 1999, se evaluó la resistencia transepitelial en muestras de tejido colorrectal humano y en muestras de ratones tratados con sustancias cancerígenas; en este estudio, se mostró que la formación del cáncer conduce a un aumento de la permeabilidad del epitelio colónico, causando una disminución de su función de barrera.(24)

Hansen et al. llevaron a cabo un estudio para explorar el acuerdo entre la evaluación de la BIA de la composición corporal y el análisis de software de las tomografías computarizadas en pacientes con CP de células no pequeñas. La conclusión del estudio indicó que ambos métodos no eran directamente comparables para las mediciones de la composición corporal. Además, se encontró que BIA sobreestimó al valor de la masa grasa. En otro estudio, Kovarik et al. proporcionaron un resumen de evidencia reciente sobre diversos métodos, incluyendo BIA, para evaluar los cambios en la composición corporal en pacientes con CP. El estudio subrayó la importancia de la BIA y el ángulo de fase derivado de BIA en la predicción de los resultados para los pacientes con CP. Del mismo modo, Gupta et al. observaron que el ángulo de fase derivado de la BIA sirvió como un indicador pronóstico independiente en pacientes con CP no pequeña en estadio IIIB y IV.(25)

Otros estudios, llevados a cabo en modelo animal, han evaluado la viabilidad de la espectroscopia de BIA para la detección de diferentes grados de displasia, la correlación entre la impedancia transmural y diferentes niveles de inflamación en colitis ulcerativa, así como el desarrollo de nuevas técnicas y la prueba de prototipos, con el objetivo de implementarlos para complementar los métodos actuales de endoscopia para mediciones *in vivo*, tales como el desarrollo de sondas con sensor de presión y equipos y sondas de medición compatibles con los equipos de endoscopia disponibles en el comercio.(26)

CONCLUSIONES

Los resultados de los estudios mencionados muestran que la bioimpedancia, tanto el análisis de bioimpedancia eléctrica como espectroscopia por bioimpedancia eléctrica, son de gran impacto para el estudio del cáncer de pulmón y tienen un alto potencial para el desarrollo de nuevas alternativas de detección temprana. Concretamente, en relación con la espectroscopia por bioimpedancia eléctrica, se vislumbra el desarrollo de nuevas técnicas menos invasivas y enfocadas en el concepto del efecto de campo carcinogénico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ramírez Martínez ND, Gallegos García V, Gaytán Hernández D, Zermeño Ugalde P, Guel Pañola JA, Ramírez Martínez ND, et al. Evaluación del ángulo de fase por bioimpedancia vectorial eléctrica en mujeres con cáncer cervicouterino. *Nutr Hosp.* diciembre de 2021;38(6):1192-9.
2. Hamed S, Altana A, Lugli P, Petti L, Ibba P. Supervised classification and circuit parameter analysis of electrical bioimpedance spectroscopy data of water stress in tomato plants. *Comput Electron Agric.* 1 de noviembre de 2024;226:109347.
3. Sales WB, Mâcedo SGGF, Gonçalves RS dos SA, Andrade LEL de, Ramalho CST, de Souza GF, et al. Use of electrical bioimpedance in the assessment of sarcopenia in the older adults: A scoping review. *J Bodyw Mov Ther.* 1 de julio de 2024;39:373-81.
4. Kassanos P. Bioimpedance Sensors: A Tutorial. *IEEE Sens J.* octubre de 2021;21(20):22190-219.
5. Leyva LQ, Ramentol CCL, Bethencourt JB, Pestana EN. Elementos teóricos y prácticos sobre la bioimpedancia eléctrica en salud. *Arch Méd Camagüey.* 25 de octubre de 2016;20(5):565-78.
6. Cardona VEA, Correa CAG, Morales SAJ. Bioimpedancia eléctrica como una alternativa para el estudio del cáncer colorrectal (CCR) basada en la teoría de cancerización de campo. *Rev Colomb Cancerol.* 29 de septiembre de 2023;27(3):380-8.

7. García del Valle-Alegría GR, Osuna-Padilla IA, Gómez-Rodríguez AL, Alarcón-Dionet A, Rodríguez-Díaz Z, Buendía-Roldán I, et al. Validación del análisis de bioimpedancia eléctrica para la evaluación de la composición corporal en pacientes con enfermedad pulmonar intersticial. *Nutr Hosp*. agosto de 2024;41(4):810-4.
8. Sales WB, Mâcedo SGGF, Gonçalves RS dos SA, Andrade LEL de, Ramalho CST, de Souza GF, et al. Use of electrical bioimpedance in the assessment of sarcopenia in the older adults: A scoping review. *J Bodyw Mov Ther* [Internet]. 1 de julio de 2024 [citado 24 de julio de 2025];39:373-81. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136085922400072X>
9. Li Y, Guo L, Yang H, Chu S, Wang X. Multiscale bioimpedance detection methods and modeling for dynamic non-destructive monitoring of agricultural product quality. *Trends Food Sci Technol* [Internet]. 1 de marzo de 2025 [citado 24 de julio de 2025];157:104888. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092422442500024X>
10. La Porta E, Faragli A, Herrmann A, Lo Muzio FP, Estienne L, Nigra SG, et al. Bioimpedance Analysis in CKD and HF Patients: A Critical Review of Benefits, Limitations, and Future Directions. *J Clin Med* [Internet]. enero de 2024 [citado 24 de julio de 2025];13(21):6502. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2077-0383/13/21/6502>
11. El Dimassi S, Gautier J, Zalc V, Boudaoud S, Istrate D. Body Water Volume Estimation Using Bio Impedance Analysis: Where Are We? *IRBM* [Internet]. 1 de junio de 2024 [citado 24 de julio de 2025];45(3):100839. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1959031824000204>
12. Scagliusi SF, Giménez-Miranda L, Pérez-García P, Olmo-Fernández A, Huertas-Sánchez G, Medrano-Ortega FJ, et al. Wearable Devices Based on Bioimpedance Test in Heart-Failure: Design Issues. *Rev Cardiovasc Med* [Internet]. 9 de septiembre de 2024 [citado 24 de julio de

2025];25(9):320.

Disponible

en:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11440418/>

13. Lapsa D, Janeliukstis R, Metshein M, Selavo L. PPG and Bioimpedance-Based Wearable Applications in Heart Rate Monitoring—A Comprehensive Review. *Appl Sci* [Internet]. enero de 2024 [citado 24 de julio de 2025];14(17):7451. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/17/7451>
14. Antoszewska M, Połomska K, Spychalski P, Kekonen A, Viik J, Barańska-Rybak W. Bioimpedance Measurement for Monitoring Chronic Wounds: A Systematic Review. *Int Wound J* [Internet]. 2025 [citado 24 de julio de 2025];22(6):e70707. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/iwj.70707>
15. Brantlov S, Ward LC, Isidor S, Hvas CL, Rud CL, Jødal L. Cell Membrane Capacitance (Cm) Measured by Bioimpedance Spectroscopy (BIS): A Narrative Review of Its Clinical Relevance and Biomarker Potential. *Sensors* [Internet]. enero de 2025 [citado 24 de julio de 2025];25(14):4362. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/14/4362>
16. Yadav M, Shukla S, Kiron V, Priyakumar UD, Maity M. Thoracic Fluid Measurements by Bioimpedance: A Comprehensive Survey [Internet]. arXiv; 2025 [citado 24 de julio de 2025]. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/2504.08351>
17. Mohamed M, Matthie J, Fan SL. Bioimpedance spectroscopy: Is a picture worth a thousand words? *Semin Dial* [Internet]. 2025 [citado 24 de julio de 2025];38(1):71-81. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/sdi.13084>
18. Mevissen M, Ducray A, Ward JM, Kopp-Schneider A, McNamee JP, Wood AW, et al. Effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on cancer in laboratory animal studies, a systematic review. *Environ Int* [Internet]. 1 de mayo de 2025 [citado 24 de julio de 2025];199:109482.

Disponible

en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412025002338>

19. Pinto R, Ardoino L, Giardullo P, Villani P, Marino C. A Systematic Review on the In Vivo Studies on Radiofrequency (100 kHz–300 GHz) Electromagnetic Field Exposure and Co-Carcinogenesis. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 2 de agosto de 2024 [citado 24 de julio de 2025];21(8):1020.

Disponible

en:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11354106/>

20. Owada K, Nicholls E, Soares Magalhães RJ, Palmieri C. Environmental exposure and cancer occurrence in dogs: a critical appraisal of evidence. *Res Vet Sci* [Internet]. 1 de marzo de 2025 [citado 24 de julio de 2025];184:105517.

Disponible

en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034528824003849>

21. Romeo S, Sannino A, Rosaria Scarfi M, Lagorio S, Zeni O. Genotoxicity of radiofrequency electromagnetic fields on mammalian cells *in vitro*: A systematic review with narrative synthesis. *Environ Int* [Internet]. 1 de noviembre de 2024 [citado 24 de julio de 2025];193:109104. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412024006901>

22. Karpiel I, Urzeniczok M, Sobotnicka E. Bioimpedance Spectroscopy—Niche Applications in Medicine: Systematic Review. En: Strumiłło P, Klepaczko A, Strzelecki M, Bociąga D, editores. *The Latest Developments and Challenges in Biomedical Engineering*. Cham: Springer Nature Switzerland; 2024. p. 311-23.

23. Park K, Jeong H, Jung Y, Suh JH, Je M, Kim J. Using biopotential and bio-impedance for intuitive human–robot interaction. *Nat Rev Electr Eng* [Internet]. 18 de julio de 2025 [citado 24 de julio de 2025];1-17. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s44287-025-00191-5>

24. Fajardo-Espinoza FS, Cabrera-Nieto SA, Espada-Vargas AL, Pérez-Camargo DA, Mohar A, Cruz-Ramos M. Phase angle as a potential tool to

evaluate chronic inflammatory state and predict quality of life deterioration in women with breast cancer and obesity: A narrative review. Nutrition [Internet]. 1 de noviembre de 2024 [citado 24 de julio de 2025];127:112524. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0899900724001734>

25. Branco MG, Mateus C, Capelas ML, Pimenta N, Santos T, Mäkitie A, et al. Bioelectrical Impedance Analysis (BIA) for the Assessment of Body Composition in Oncology: A Scoping Review. Nutrients [Internet]. enero de 2023 [citado 24 de julio de 2025];15(22):4792. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2072-6643/15/22/4792>
26. Paternina FJP, Pereira ML, Durán JLJ, Barbosa JB. Aplicaciones médico-nutricionales de la impedancia bioeléctrica (BIA) en el paciente críticamente enfermo: una revisión narrativa. Rev Nutr Clínica Metab [Internet]. 24 de mayo de 2023 [citado 24 de julio de 2025];6(2):138-54. Disponible en: <https://revistanutricionclinicametabolismo.org/>