

Electroquímica al servicio de la salud: sensores que detectan albúmina en la lucha contra la enfermedad renal crónica

Mtro. Johan S. Barreneche Vasquez

Dr. Noé Arjona*

Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica
wvelazquez@cideteq.mx

Resumen

Las enfermedades renales aumentan a nivel mundial y muchas avanzan sin síntomas, por lo que detectarlas a tiempo es clave para evitar daños graves. Una forma de hacerlo es medir la albúmina, una proteína cuya presencia en la orina indica problemas en los riñones. No obstante, los métodos actuales suelen ser costosos, lentos y requieren laboratorios especializados. Este artículo presenta una alternativa prometedora: los sensores electroquímicos, dispositivos capaces de transformar reacciones químicas en señales eléctricas para identificar sustancias específicas. El uso de nanomateriales —estructuras muy pequeñas con alta capacidad de detección—, polímeros de impresión molecular —materiales diseñados para reconocer una molécula particular— y biorreceptores —componentes biológicos que actúan como “llaves” de reconocimiento— está permitiendo desarrollar sensores más precisos, portátiles y accesibles. Estas tecnologías podrían transformar el seguimiento de la salud renal, facilitando diagnósticos rápidos, económicos y cercanos al paciente, lo que representa una oportunidad para mejorar la calidad de vida y fortalecer la prevención de enfermedades renales.

Introducción

En el contexto actual de la medicina personalizada y los diagnósticos rápidos, la detección de biomarcadores se ha consolidado como una herramienta fundamental para monitorear el estado de salud de los pacientes. Entre estos biomarcadores,

la albúmina es una proteína abundante en la sangre que destaca por su relevancia clínica al proporcionar información valiosa sobre la progresión de enfermedades hepáticas y, especialmente, renales.

Una de las afecciones más críticas asociadas a los niveles alterados de albúmina es la enfermedad renal crónica (ERC), la cual representa la segunda causa de muerte en Centroamérica y se ubica entre las principales a nivel mundial. En particular, México registra la mayor cantidad de años de vida ajustados por discapacidad debido a esta patología (Figura 1a) [1], [2]. En este contexto, el monitoreo confiable, rápido y accesible de los niveles de albúmina se perfila como una estrategia clave para la detección oportuna y el manejo eficaz de la ERC.

¿Qué es un biomarcador y por qué la albúmina sirve como uno en el control de la ERC?

Los biomarcadores clínicos son moléculas o sustancias medibles que se encuentran en el cuerpo y sirven como indicadores del funcionamiento normal o alterado de un organismo. En este sentido, la albúmina tiene un gran valor clínico: representa más del 50% de la proteína total del plasma sanguíneo y juega un papel crucial en la regulación de procesos fisiológicos esenciales [3]. Además, es una proteína metabolizada y reutilizada una vez que completa su ciclo útil, por lo que su excreción por medio de la orina tiende a ser baja y relativamente constante bajo condiciones normales, como se muestra en el escenario superior de la Figura 1b.

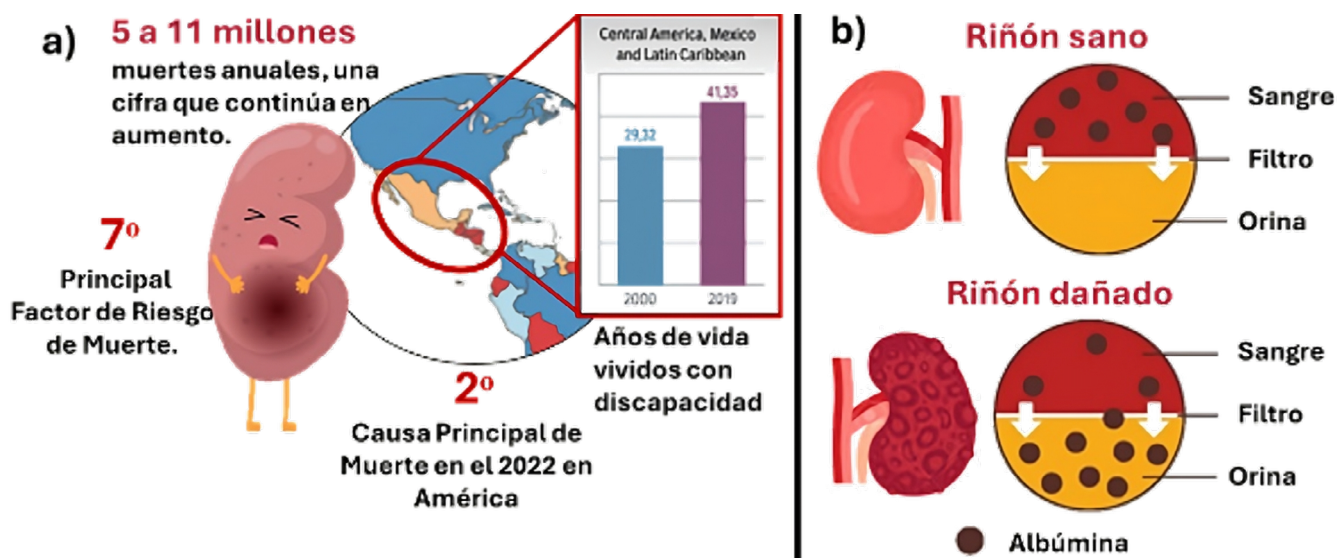


Figura 1. a) Crecimiento de las enfermedades renales a nivel global, impacto en América y México. b) Presencia de albúmina en la orina asociada a daño renal.

Sin embargo, cuando se presentan afecciones renales, como en el caso de la ERC, las unidades de filtración del riñón se ven afectadas, lo que permite que la albúmina se filtre y se excrete en la orina en mayor cantidad [4], como se representa en el escenario inferior de la Figura 1b. Este aumento se conoce como albuminuria y representa un importante factor

de riesgo para la progresión de la ERC. De hecho, algunos estudios sugieren que más del 50% de los casos de ERC podrían pasar desapercibidos si se ignora la albuminuria [4]. Por lo tanto, el correcto monitoreo de la albúmina permite identificar tempranamente el daño renal y tomar medidas para prevenir su progresión.

Detección de albúmina: limitaciones de los métodos convencionales.

La detección clínica de albúmina se ha realizado mediante técnicas como cromatografía, espectrofotometría, electroforesis y ensayos inmunoquímicos. Sin embargo, estas tecnologías enfrentan desafíos frente a las demandas actuales: altos costos, necesidad de equipos especializados, largos tiempos de análisis y dependencia de personal capacitado para obtener resultados confiables (Figura 2).

Además, los métodos más económicos o sencillos suelen carecer de la sensibilidad o selectividad necesarias para garantizar el adecuado seguimiento de la albúmina en muestras biológicas complejas como la orina o la sangre, donde abundan otras moléculas que pueden interferir en el análisis [2]. Esto obliga a procedimientos extensos de laboratorio, lo que aumenta el tiempo de entrega de resultados y puede introducir errores [4], [5].

Actualmente se buscan nuevas estrategias para el seguimiento de la albúmina, principalmente enfocadas en el desarrollo de sensores que tengan la capacidad de detectar exclusivamente la molécula objetivo, incluso cuando hay otras sustancias presentes en la muestra, y que puedan identificar pequeñas cantidades del biomarcador, lo cual es clave para diagnósticos tempranos de la ERC [6].

Sensores electroquímicos como una alternativa prometedora.

Con el fin de mejorar la detección de albúmina han surgido nuevas estrategias basadas en el desarrollo de sensores electroquímicos, los cuales han demostrado tener el potencial para brindar la determinación rápida, precisa y accesible de la albúmina en muestras de sangre y orina.

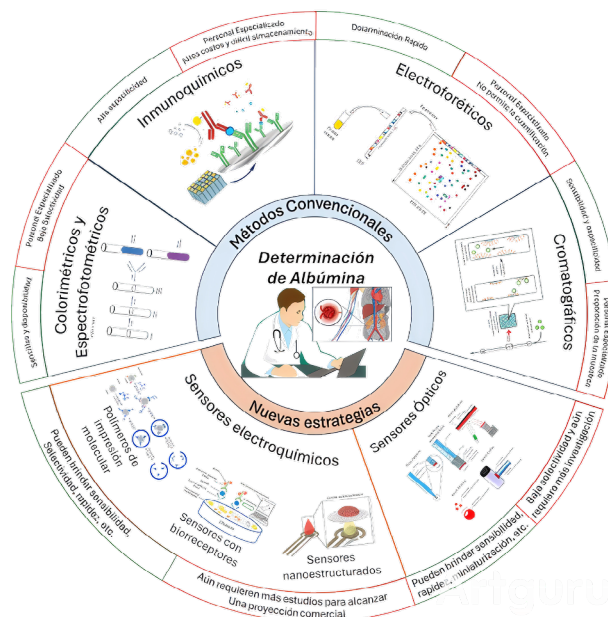


Figura 2. Representación de las principales técnicas implementadas para la determinación de albúmina en muestras de sangre y orina. En la parte superior aparecen las convencionales; en la inferior, nuevas estrategias con sus ventajas y desventajas.

Estos dispositivos funcionan mediante una señal eléctrica generada por la interacción entre el biomarcador y una plataforma de reconocimiento constituida por un electrodo con superficie modificada.

Un ejemplo notable del éxito de esta tecnología son los sensores de glucosa, ampliamente utilizados para el monitoreo rápido y preciso de los niveles de azúcar en sangre en pacientes diabéticos, convirtiéndose en una de las tecnologías que domina el mercado del análisis clínico [7], [8].

En el caso de la albúmina, aunque los sensores aún se encuentran en desarrollo, incorporan tecnologías como materiales nanoestructurados, polímeros de impresión molecular (PIM, materiales con cavidades diseñadas para atrapar moléculas específicas) y biorreceptores. Estas superficies buscan mejorar la selectividad y sensibilidad de los sensores, superando varios problemas asociados a la detección de albúmina en muestras humanas.

combinados con materiales nanoestructurados, permiten obtener alta sensibilidad [10], [11]. Son promisorios por su estabilidad y bajo costo de fabricación.

Sensores con biorreceptores

En este caso, la superficie de reconocimiento contiene estructuras biológicas como anticuerpos o aptámeros (fragmentos de ADN o ARN diseñados para reconocer moléculas específicas). Estas moléculas se unen selectivamente a la albúmina (Figura 3d).

Gracias a su alta especificidad, estos sensores permiten detectar niveles muy bajos del biomarcador. Sin embargo, suelen tener mayor costo de producción y menor estabilidad frente a cambios del entorno [12].

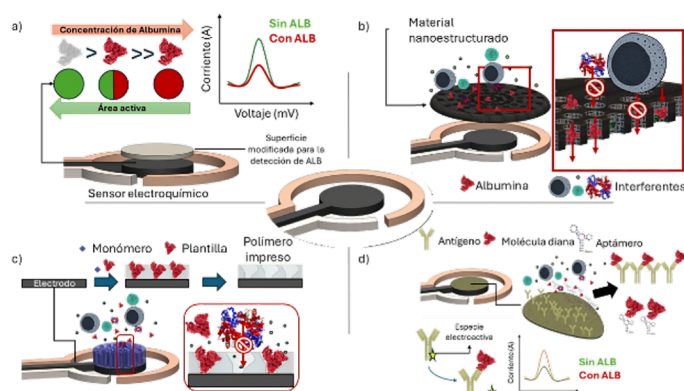


Figura 3. a) Representación del mecanismo de determinación electroquímica de albúmina mediante sensores de afinidad. b) Uso de materiales nanoestructurados. c) Polímeros de impresión molecular. d) Biorreceptores.

Perspectivas de aplicación clínica

En el campo del diagnóstico médico existe una tendencia hacia pruebas más sencillas y rápidas. En particular, los diagnósticos en el punto de atención (DPA, pruebas realizadas fuera del laboratorio en menos de una hora) son cada vez más demandados [6].

Los sensores electroquímicos, debido a su tamaño compacto, bajos costos de fabricación y capacidad de integración con dispositivos móviles y

microchips, resultan ideales para estas aplicaciones, demostrando su potencial en la lucha contra la ERC.

Conclusión: una herramienta del futuro para el diagnóstico de la ERC

Los sensores electroquímicos están revolucionando la detección de albúmina y, con ello, el diagnóstico y monitoreo de enfermedades como la enfermedad renal crónica. Gracias a materiales nanoestructurados, biorreceptores y polímeros de impresión molecular, se ha mejorado significativamente su sensibilidad y selectividad, haciéndolos promisorios para el desarrollo de dispositivos DPA que permitan una detección más accesible, rápida y práctica.

Referencias

- [1] OPS, La carga de enfermedades renales en la Región de las Américas, 2000–2019, Portal de Datos ENLACE. Disponible en: https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=15853%3Adata-portal-enlace-ckd-burden&Itemid=0&lang=es
- [2] A. Francis et al., "Chronic kidney disease and the global public health agenda: an international consensus," *Nature Reviews Nephrology*, vol. 20, no. 7, pp. 473–485, 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41581-024-00820-6>
- [3] E. Gremese, D. Bruno, V. Varriano, S. Perniola, L. Petricca, and G. Ferraccioli, "Serum Albumin Levels: A Biomarker to Be Repurposed in Different Disease Settings in Clinical Practice," *Journal of Clinical Medicine*, vol. 12, no. 18, p. 6017, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/jcm12186017>
- [4] A. S. Levey, C. Becker, and L. A. Inker, "Glomerular Filtration Rate and Albuminuria for Detection and Staging of Acute and Chronic Kidney Disease in Adults," *JAMA*, vol. 313, no. 8, p. 837, Feb. 2015, doi: <https://doi.org/10.1001/jama.2015.0602>
- [5] J. I. Park, H. Baek, B. R. Kim, and H. H. Jung, "Comparison of urine dipstick and albumin:creatinine ratio for chronic kidney disease screening: A population-based study," *PLoS One*, vol. 12, no. 2, p. e0171106, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171106>
- [6] E. C. Wilkerson et al., "Affinity-based electrochemical sensors for biomolecular detection in whole blood," *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 415, no. 18, pp. 3983–4002, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s00216-023-04627-5>
- [7] Y. Yang et al., "Glucose sensors based on electrodeposition of molecularly imprinted polymeric micelles: A novel strategy for MIP sensors," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 26, no. 5, pp. 2607–2612, Jan. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2010.11.015>
- [8] R. M. Rhemrev-Boom, R. G. Tiessen, A. A. Jonker, K. Venema, P. Vadvama, and J. Korf, "A lightweight measuring device for the continuous in vivo monitoring of glucose by means of ultraslow

Referencias

- microdialysis in combination with a miniaturised flow-through biosensor," *Clinica Chimica Acta*, vol. 316, no. 1–2, pp. 1–10, Feb. 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0009-8981\(01\)00574-5](https://doi.org/10.1016/S0009-8981(01)00574-5)
- [9] P. Yomthiangthae, O. Chailapakul, and W. Siangproh, "Rapid urinary albumin detection using a simple redox cycling process coupled with a paper-based device," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 911, p. 116230, Apr. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116230>
- [10] A. Jahanban-Esfahlan and R. Amarowicz, "Molecularly imprinted polymers for sensing/depleting human serum albumin (HSA): A critical review of recent advances and current challenges," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 266, p. 131132, May 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbio-mac.2024.131132>
- [11] G. Zhang, Y. Yu, M. Guo, B. Lin, and L. Zhang, "A sensitive determination of albumin in urine by molecularly imprinted electrochemical biosensor based on dual-signal strategy," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 288, pp. 564–570, Jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.03.042>
- [12] N. J. Ronkainen, H. B. Halsall, and W. R. Heineman, "Electrochemical biosensors," *Chemical Society Reviews*, vol. 39, no. 5, p. 1747, 2010, doi: <https://doi.org/10.1039/b714449k>

