

Portable Technologies in Clinical Biochemistry, from the laboratory to the point of care

Tecnologías Portátiles en Bioquímica Clínica, del laboratorio al punto de cuidado

Gisselle Diaz Breto¹ , Yohanka Pérez Alvarez¹ , Felix Antonio Rego Rodríguez² 

¹Universidad de Ciencias Médicas de Pinar del Río. Facultad de Ciencias Médicas “Dr. Ernesto Guevara de la Serna”, Departamento de Ciencias Básicas Biomédicas. Pinar del Río, Cuba.

²Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Médicas. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

Cite as

Diaz Breto G, Pérez Alvarez Y, Rego Rodríguez FA. Portable Technologies in Clinical Biochemistry, from the laboratory to the point of care. SAP Biomedical & Chemical Engineering Innovation. 2025; 4:160. <https://doi.org/10.56294/evk2025160>

Publication History

Submitted: 21-08-2024

Revised: 28-12-2024

Accepted: 25-04-2025

Published: 26-04-2025

Corresponding Author

Gisselle Diaz Breto 

ABSTRACT

Constant advances in science, technology, and innovation have favored the development of biomedical sciences, providing them with tools such as computer science and artificial intelligence. In the field of clinical biochemistry, advances are needed to optimize and accelerate timely diagnosis. This article aims to describe the advantages and usefulness of POCT devices for diagnosis in clinical biochemistry. Portable technologies in clinical biochemistry applied to laboratory diagnosis promise to overcome the barriers of conventional techniques (time, infrastructure, cost, sensitivity, and specificity). Their usefulness varies, being applicable in response to pandemics, for the management of chronic diseases, promoting accessibility and equity in health, and improving the efficiency of the system while empowering the patient. Similarly, the possibility of integration into wearable devices and smartphones makes it an accessible and attractive medium. Use cases were identified that demonstrate not only its theoretical usefulness but also its actual capacity for use in practice.

Keywords: Clinical Biochemistry; Clinical Laboratory; Point-of-Care Testing; Nanoparticles; Wearable Devices.

RESUMEN

Los constantes avances en materia de Ciencia, Tecnología e Innovación han favorecido el desarrollo de las Ciencias Biomédicas, dotándolas de herramientas como la informática y la inteligencia artificial. En el campo de la bioquímica clínica, se hacen necesarios avances que optimicen y aceleren el diagnóstico oportuno. Este artículo tiene como objetivo describir las ventajas y utilidad de los dispositivos POCT para el diagnóstico en bioquímica clínica. Las tecnologías portátiles en Bioquímica Clínica aplicadas al diagnóstico de laboratorio prometen superar las barreras de las técnicas convencionales (tiempo, infraestructura, coste, sensibilidad y especificidad). Su utilidad varía, siendo aplicable en respuesta a pandemias, para la gestión de enfermedades crónicas, favorece la accesibilidad y equidad en salud y mejora la eficiencia del sistema a la par que empodera al paciente. De igual forma, la posibilidad de integración en dispositivos Wearables y Smartphones lo hacen un medio accesible y atractivo. Se identificaron casos de uso, que mueran no solo su utilidad teórica, sino la capacidad real de utilización en la práctica.

Palabras clave: Bioquímica Clínica; Laboratorio Clínico; Pruebas en el Punto de Atención; Nanopartículas; Dispositivos Wearables.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los avances en la era de las tecnologías de la información y las comunicaciones ha propiciado la modernización de cada uno de los sectores de la sociedad. El uso de computadoras más potentes,⁽¹⁾ el internet de las cosas (IoT)⁽²⁾ e inteligencia artificial se ha integrado, o se encuentra en proceso de integración al día a día de la sociedad.⁽³⁾

En las Ciencias Biomédicas esto no ha sido diferente, integrándose en procesos de enseñanza, diagnóstico y toma de decisiones en la práctica clínica basada en la evidencia. Estas nuevas tecnologías han favorecido el desarrollo y optimización de procesos y tratamientos.⁽⁴⁾

La práctica de la medicina moderna se encuentra en una encrucijada: por un lado, la capacidad de los laboratorios clínicos para analizar biomarcadores con alta precisión nunca ha sido mayor; por otro, el modelo operativo sobre el que se sustenta este poder —centralizado, reactivo y dependiente de una infraestructura masiva— se ha convertido en un cuello de botella que limita la agilidad, la accesibilidad y la equidad de la atención sanitaria a nivel global.⁽⁴⁾

La respuesta a las limitaciones del modelo centralizado es la descentralización del diagnóstico a través de las pruebas en el punto de atención (Point-of-Care Testing, POCT). El POCT representa una transformación fundamental en la prestación de servicios de salud, trasladando la capacidad diagnóstica desde el laboratorio hasta la cabecera del paciente o incluso el hogar.⁽⁵⁾

Este artículo tiene como objetivo describir las ventajas y utilidad de los dispositivos POCT para el diagnóstico en bioquímica clínica.

DESARROLLO

Limitaciones de los métodos tradicionales

Los métodos de diagnóstico convencionales, como el ensayo por inmunoabsorción ligado a enzimas (ELISA), la reacción en cadena de la polimerasa cuantitativa (qPCR)⁽⁶⁾ y los cultivos microbiológicos,⁽⁷⁾ son considerados como “*Gold Standard*” por su robustez y fiabilidad. Sin embargo, para su desarrollo eficiente y eficaz, se hace necesaria una infraestructura de laboratorios que impone limitaciones operativas.

Una de las principales limitaciones reside en el tiempo hasta la obtención de los resultados. Los cultivos microbiológicos para la identificación de patógenos son procesos de prolongada duración, que pueden requerir hasta días; en circunstancias como la sepsis, el tiempo equivale a una reducción de la posibilidad de supervivencia.⁽⁴⁾ Esta latencia también afecta en el manejo de enfermedades donde se requiere de la integración de varias pruebas serológicas, como es el caso de la sífilis, alargando los tiempos de respuesta.⁽⁸⁾ Incluso, pruebas como el qPCR, que es una prueba más rápida, implican procesos que consumen mucho tiempo y no son prácticas en el punto de atención.⁽⁹⁾

En segundo lugar, la infraestructura y el coste representan un obstáculo de valor. Los laboratorios centralizados dependen de instrumentación voluminosa, costosa y compleja —como termocicladores, lectores de placas y sistemas de electroforesis— que exige entornos controlados y personal altamente cualificado para su operación y mantenimiento.⁽¹⁰⁾ Estos elevados requisitos de capital y los costes operativos continuos de los reactivos limitan drásticamente su implementación en países de ingresos bajos y medianos, así como en zonas rurales o con recursos limitados.⁽⁴⁾ Métodos como el ELISA, aunque conceptualmente más simples, pueden acarrear costes elevados y sufrir de una pobre estabilidad térmica, lo que incrementa los gastos.⁽⁹⁾

De igual forma, los métodos tradicionales no son infalibles, y pueden presentar deficiencias en cuanto a su sensibilidad y especificidad. Estos pueden carecer de la sensibilidad necesaria para la detección temprana de enfermedades, fase en la cual los biomarcadores se expresan en mínimas o bajas concentraciones.⁽¹⁰⁾ Los cultivos de patógenos de difícil crecimiento pueden fallar, o pueden estar afectados en muestras de pacientes que ya han recibido antibióticos, resultando en falsos negativos.⁽⁴⁾ Por su parte, los inmunoensayos pueden ser susceptibles a altas tasas de falsos positivos y a reactividad cruzada, lo que compromete la especificidad del diagnóstico.⁽⁹⁾

La Demanda de Diagnósticos Descentralizados y en el Punto de Atención (POCT)

La demanda de esta transición está impulsada por varios factores críticos:

- Respuesta a pandemias: la crisis causada de la COVID-19 demostró de manera inequívoca la necesidad vital de pruebas rápidas, masivas y accesibles para controlar la transmisión de enfermedades infecciosas. Esta urgencia actuó como un catalizador, acelerando la innovación y las vías regulatorias para los dispositivos POCT a una escala sin precedentes.⁽¹¹⁾
- Gestión de enfermedades crónicas: enfermedades como la diabetes, las enfermedades cardiovasculares o las enfermedades inflamatorias intestinales (EII) requieren un monitoreo frecuente y continuo. El POCT empodera a los pacientes permitiendo el seguimiento en el hogar, lo que mejora la calidad de vida, fomenta la adherencia al tratamiento y permite intervenciones médicas proactivas antes de que se produzcan complicaciones graves.⁽¹²⁾
- Accesibilidad y equidad en salud: el POCT es una herramienta fundamental para extender el alcance del diagnóstico a comunidades remotas, rurales o desatendidas que carecen de la infraestructura de un laboratorio centralizado. Al superar las barreras geográficas y económicas, el POCT tiene el potencial de reducir las disparidades y promover una mayor equidad en el acceso a la atención sanitaria.⁽¹³⁾
- Eficiencia del sistema y empoderamiento del paciente: al facilitar el diagnóstico fuera del hospital, el POCT puede aliviar la carga de trabajo de los laboratorios centrales, reducir los costes generales del sistema de salud al disminuir las hospitalizaciones y optimizar el uso de recursos. Además, involucra activamente a los pacientes en la gestión de su propia salud, un cambio de paradigma que cuenta con un fuerte apoyo público, como lo demuestran encuestas donde una mayoría de pacientes se muestra dispuesta a realizar autodiagnósticos.⁽¹⁴⁾

Biosensores vestibles o usables (Wearables) para el monitoreo continuo y no invasivo

Los biosensores vestibles (wearables) representan un cambio de paradigma hacia el monitoreo continuo y no invasivo de la fisiología de una persona. Estos dispositivos, que se presentan en forma de parches cutáneos, pulseras o incluso textiles inteligentes, están diseñados para analizar biomarcadores en fluidos biológicos fácilmente accesibles, principalmente el sudor.⁽¹⁵⁾

El sudor, lejos de ser solo agua, es un biofluido rico en información que contiene una amplia gama de analitos, incluyendo electrolitos (Na⁺, Cl⁻), metabolitos (glucosa, lactato, ácido úrico), hormonas (cortisol) y fármacos.^(15,16) El análisis de estos biomarcadores en tiempo real puede proporcionar información valiosa sobre el estado de hidratación, la fatiga muscular, los niveles de estrés, la respuesta a la dieta e incluso servir como herramienta de diagnóstico para enfermedades como la fibrosis quística (a través de los niveles de cloruro) o la enfermedad inflamatoria intestinal (midiendo citoquinas como el TNF- α).⁽¹⁷⁾

La tecnología de estos wearables suele combinar una plataforma microfluídica blanda y flexible para la recolección y el transporte controlado del sudor, con una serie de sensores electroquímicos para la detección. La microfluídica es crucial para guiar el sudor hacia las zonas de detección, evitar la evaporación y la contaminación, y permitir el muestreo secuencial.^(15,18)

Los sensores electroquímicos, a su vez, utilizan electrodos modificados con nanomateriales (como grafeno, nanotubos de carbono o nanopartículas metálicas) y enzimas específicas para lograr una detección altamente sensible y selectiva de los analitos diana.⁽¹⁷⁾ Un precursor comercial de esta tecnología fue el GlucoWatch, uno de los primeros dispositivos aprobados por la FDA para la monitorización no invasiva de la glucosa a través de la piel.⁽¹⁹⁾

Integración con Smartphones

El smartphone se ha convertido en el nexo democratizador que une estas diversas plataformas de hardware. Su ubicuidad, junto con sus capacidades tecnológicas intrínsecas —cámaras de alta resolución, potencia de procesamiento, conectividad inalámbrica y una plétora de sensores integrados—, lo convierte en una plataforma de lectura y análisis casi universal para el POCT.⁽²⁰⁾

Esta integración se manifiesta de varias maneras:

- **Análisis de Imagen:** La cámara del smartphone, a menudo complementada con un simple accesorio impreso en 3D para estandarizar la iluminación y el posicionamiento, se utiliza para capturar y cuantificar los resultados de los ensayos. Algoritmos de procesamiento de imágenes y de inteligencia artificial pueden analizar la intensidad de las señales colorimétricas o fluorescentes para proporcionar un resultado cuantitativo y objetivo.⁽²⁰⁾ Empresas como Healthy.io han demostrado la viabilidad de este enfoque, transformando la cámara de un smartphone en un dispositivo de grado clínico para el análisis de orina.^(21,22)
- **Lectores Externos Conectados:** Una amplia gama de dispositivos de diagnóstico se diseñan ahora para conectarse directamente a un smartphone, que actúa como unidad de visualización, procesamiento y comunicación. Ejemplos notables incluyen el monitor de electrocardiograma (EKG) personal de AliveCor⁽²³⁾ y el ecógrafo portátil de sonda única de Butterfly iQ.^(24,25)
- **Gestión de datos y ecosistema de telesalud:** las aplicaciones móviles van más allá de la simple lectura de un resultado. Guían al usuario a través del procedimiento de la prueba, registran los datos a lo largo del tiempo, los conectan de forma segura con los registros de salud electrónicos (EHR) y facilitan su compartición con los profesionales sanitarios. Esto crea un ecosistema completo de telesalud, permitiendo el monitoreo remoto y una atención más conectada.^(25,26)

Casos de éxito en el mundo real: de la investigación al impacto

La viabilidad de estas tecnologías no es meramente teórica, sino que varios productos y proyectos han demostrado su impacto en el mundo real.

Abbott BinaxNOW™ COVID-19 Ag Card

Este dispositivo es el arquetipo del éxito del POCT en una crisis de salud pública. Es una tira reactiva de flujo lateral simple e ingenioso para la detección cualitativa del antígeno del SARS-CoV-2. Su diseño, que no requiere instrumentación y ofrece un resultado visual en 15 minutos, permitió su distribución masiva y su uso tanto por profesionales como por el público general bajo una Autorización de Uso de Emergencia (EUA) de la FDA.⁽²⁷⁾

Su despliegue masivo, a menudo acompañado de aplicaciones móviles como NAVICA™ para el registro de resultados, fue fundamental para las estrategias de salud pública durante la pandemia, demostrando el poder del diagnóstico descentralizado.⁽²⁷⁾

Diagnóstico de VIH en Entornos de Bajos Recursos

La lucha contra el VIH en entornos con recursos limitados ha sido un poderoso motor de innovación en POCT. El mChip, desarrollado por investigadores de la Universidad de Columbia, es un dispositivo microfluídico que realiza un ensayo ELISA completo en un chip de bajo coste (menos de 1 dólar por prueba).⁽²⁸⁾

Utilizando solo 1 μ L de sangre total sin procesar, puede diagnosticar simultáneamente VIH y sífilis en menos de 20 minutos con una sensibilidad y especificidad que rivalizan con las de las pruebas de laboratorio de referencia.⁽²⁸⁾ Paralelamente, las tecnologías basadas en papel, como los μ PADs (dispositivos analíticos microfluídicos basados en papel), son extremadamente prometedoras.⁽²⁹⁾ Aprovechan el flujo capilar para mover los fluidos, eliminando la necesidad de bombas o fuentes de energía externas, lo que los hace ideales para el diagnóstico en las comunidades más remotas y desatendidas.⁽³⁰⁾

CONCLUSIONES

Las tecnologías portátiles en Bioquímica Clínica aplicadas al diagnóstico de laboratorio prometen superar las barreras de las técnicas convencionales (tiempo, infraestructura, coste, sensibilidad y especificidad). Su utilidad varía, siendo aplicable en respuesta a pandemias, para la gestión de enfermedades crónicas, favorece la accesibilidad y equidad en salud y mejora la eficiencia del sistema a la par que empodera al paciente. De igual forma, la posibilidad de integración en dispositivos Wearables y Smartphones lo hacen un medio accesible y atractivo. Se identificaron casos de uso, que mueran no solo su utilidad teórica, sino la capacidad real de utilización en la práctica.

FINANCIACIÓN

Ninguna.

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Gisselle Díaz Breto, Yohanka Pérez Alvarez, Felix António Rego Rodríguez.

Investigación: Gisselle Díaz Breto, Yohanka Pérez Alvarez, Felix António Rego Rodríguez.

Redacción – borrador inicial: Gisselle Díaz Breto, Yohanka Pérez Alvarez, Felix António Rego Rodríguez.

Redacción – revisión y edición: Gisselle Díaz Breto, Yohanka Pérez Alvarez, Felix António Rego Rodríguez.

REFERENCIAS

1. Rojas Puentes MP, Parada CJ, Leal Pabón J. ESTRUCTURAS DESGLOSADAS DE TRABAJO (EDT) EN LA GESTIÓN DE ALCANCE DE PROYECTOS DE DESARROLLO DE SOFTWARE. RCTA 2023;1:51-8. <https://doi.org/10.24054/rcta.v1i39.1375>.
2. Medina-Barahona CJ, Mora GA, Calvache-Pabón C, Salazar-Castro JA, Mora-Paz HA, Mayorca-Torres D. PROPUESTA DE ARQUITECTURA IOT ORIENTADA A LA CREACIÓN DE PROTOTIPOS PARA SU APLICACIÓN EN PLATAFORMAS EDUCATIVAS Y DE INVESTIGACIÓN. RCTA 2023;1:118-25. <https://doi.org/10.24054/rcta.v1i39.1405>.
3. Jiménez Pérez GA, Hernández De La Cruz JM. Applications of Artificial Intelligence in Contemporary Sociology. LatIA 2024;1:12. <https://doi.org/10.62486/latia202412>.
4. Alsharksi AN, Sirekbasan S, Gürkök-Tan T, Mustapha A. From Tradition to Innovation: Diverse Molecular Techniques in the Fight Against Infectious Diseases. Diagnostics 2024;14:2876. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14242876>.
5. Gupta E, Saxena J, Kumar S, Sharma U, Rastogi S, Srivastava VK, et al. Fast Track Diagnostic Tools for Clinical Management of Sepsis: Paradigm Shift from Conventional to Advanced Methods. Diagnostics 2023;13:277. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13020277>.
6. Ferreira Frasson LDS, Chiachiera D. Combined diagnosis of CNS infections in the post-surgical setting. South Health and Policy 2025;1:11. <https://doi.org/10.56294/shp202211>.
7. Lazaga-González L, Leyva-Samuel L, Ferrer-Ballester R, García-Bacallao Y, Pérez-González Y, Carbonell-Mesa IE. Malaria behavior in adult patients. Cacolo Municipal Hospital, Lunda Sul, Angola. South Health and Policy 2023;2:61-61. <https://doi.org/10.56294/shp202361>.
8. Treger RS, Menza TW, Truong TT, Lieberman JA. Advances in Syphilis Diagnostics to Address the 21st-Century Epidemic. Clinical Chemistry 2025:hvaf072. <https://doi.org/10.1093/clinchem/hvaf072>.
9. Mukherjee R, Vidic J, Auger S, Wen H-C, Pandey RP, Chang C-M. Exploring Disease Management and Control through Pathogen Diagnostics and One Health Initiative: A Concise Review. Antibiotics 2023;13:17. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13010017>.
10. Liu Q, Jin X, Cheng J, Zhou H, Zhang Y, Dai Y. Advances in the application of molecular diagnostic techniques for the detection of infectious disease pathogens (Review). Mol Med Rep 2023;27:104. <https://doi.org/10.3892/mmr.2023.12991>.
11. Kubina R, Dziedzic A. Molecular and Serological Tests for COVID-19. A Comparative Review of SARS-CoV-2 Coronavirus Laboratory and Point-of-Care Diagnostics. Diagnostics 2020;10:434. <https://doi.org/10.3390/diagnostics10060434>.
12. Brendish NJ, Poole S, Naidu VV, Mansbridge CT, Norton NJ, Wheeler H, et al. Clinical impact of molecular point-of-care testing for suspected COVID-19 in hospital (COV-19POC): a prospective, interventional, non-randomised, controlled study. The

Lancet Respiratory Medicine 2020;8:1192-200. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30454-9](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30454-9).

13. Valera E, Jankelow A, Lim J, Kindratenko V, Ganguli A, White K, et al. COVID-19 Point-of-Care Diagnostics: Present and Future. ACS Nano 2021;15:7899-906. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c02981>.

14. Saha A, Andrewartha K, Badman SG, Tangey A, Smith KS, Sandler S, et al. Flexible and Innovative Connectivity Solution to Support National Decentralized Infectious Diseases Point-of-Care Testing Programs in Primary Health Services: Descriptive Evaluation Study. J Med Internet Res 2023;25:e46701. <https://doi.org/10.2196/46701>.

15. Jo S, Sung D, Kim S, Koo J. A review of wearable biosensors for sweat analysis. Biomed Eng Lett 2021;11:117-29. <https://doi.org/10.1007/s13534-021-00191-y>.

16. Wad M, Hussein AA, Almaamori MH. Electrochemical Sensors based on Conductive Polymers Incorporate of Nano Material for the Detection of Hydrogen Peroxide (H₂O₂). Salud, Ciencia y Tecnología - Serie de Conferencias 2024;3:850-850. <https://doi.org/10.56294/sctconf2024850>.

17. Chen M, Zhang J, Ji G, Wang H, Zhu B, Chen C, et al. Universal Flexible Wearable Biosensors for Noninvasive Health Monitoring. ACS Appl Mater Interfaces 2025;17:20741-55. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c22623>.

18. Sidiq M, Chahal A, Gupta S, Reddy Vajrala K. Advancement, utilization, and future outlook of Artificial Intelligence for physiotherapy clinical trials in India: An overview. Interdisciplinary Rehabilitation / Rehabilitacion Interdisciplinaria 2023;4:73. <https://doi.org/10.56294/ri202473>.

19. Xu J, Fang Y, Chen J. Wearable Biosensors for Non-Invasive Sweat Diagnostics. Biosensors 2021;11:245. <https://doi.org/10.3390/bios11080245>.

20. Schary W, Paskali F, Rentschler S, Ruppert C, Wagner GE, Steinmetz I, et al. Open-Source, Adaptable, All-in-One Smartphone-Based System for Quantitative Analysis of Point-of-Care Diagnostics. Diagnostics 2022;12:589. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12030589>.

21. Muhamad N, Youngvises N, Plengsuriyakarn T, Meesiri W, Chaijaroenkul W, Na-Bangchang K. MyACR: A Point-of-Care Medical Device for Determination of Albumin–Creatinine Ratio (uACR) in Random Urine Samples as a Marker of Nephropathy. Diagnostics 2024;14:1702. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14161702>.

22. Ra M, Muhammad MS, Lim C, Han S, Jung C, Kim W-Y. Smartphone-Based Point-of-Care Urinalysis Under Variable Illumination. IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine 2018;6:1-11. <https://doi.org/10.1109/JTEHM.2017.2765631>.

23. Chan P, Wong C, Poh YC, Pun L, Leung WW, Wong Y, et al. Diagnostic Performance of a Smartphone-Based Photoplethysmographic Application for Atrial Fibrillation Screening in a Primary Care Setting. JAHA 2016;5:e003428. <https://doi.org/10.1161/JAHA.116.003428>.

24. Rubegni G, Zeppieri M, Russo A, Castellino N, Fruschelli M, Hadjistilianou T, et al. Comparing New Smartphone-Connected Handheld Ultrasound Device vs. Traditional Ultrasound in Vitreo-Retinal Disease Diagnosis. Diagnostics 2024;14:1961. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14171961>.

25. Bacariza J, Gonzalez FA, Varudo R, Leote J, Martins C, Fernandes A, et al. Smartphone-based automatic assessment of left ventricular ejection fraction with a silicon chip ultrasound probe: a prospective comparison study in critically ill patients. British Journal of Anaesthesia 2023;130:e485-7. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2023.02.032>.

26. Gonzalez-Argote J, Castillo-González W. Productivity and Impact of the Scientific Production on Human-Computer Interaction in Scopus from 2018 to 2022. Multidisciplinar (Montevideo) 2023;1:10-10. <https://doi.org/10.62486/agmu20233>.

27. Abbott Diagnostics Scarborough, Inc. Abbott BinaxNOW™ COVID-19 Ag Card, s. f.

28. Chin CD, Laksanasopin T, Cheung YK, Steinmiller D, Linder V, Parsa H, et al. Microfluidics-based diagnostics of infectious diseases in the developing world. Nat Med 2011;17:1015-9. <https://doi.org/10.1038/nm.2408>.

29. Vashist SK, Luong JHT. Smartphone-Based Point-of-Care Technologies for Mobile Healthcare. Point-of-Care Technologies Enabling Next-Generation Healthcare Monitoring and Management, Cham: Springer International Publishing; 2019, p. 27-79.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-11416-9_2.

30. Tharakan S, Faqah O, Asghar W, Ilyas A. Microfluidic Devices for HIV Diagnosis and Monitoring at Point-of-Care (POC) Settings. *Biosensors (Basel)* 2022;12:949. <https://doi.org/10.3390/bios12110949>.