

Artículo de revisión bibliográfica

Dispositivos para control de glucosa a través del sudor en diabéticos

Device for glucose control through sweat in diabetics

Keila Cusi Machaca

Universidad Privada del Valle

RESUMEN

La medición de la concentración de la glucosa en sangre en personas con diabetes es base fundamental para mantener controlados a los pacientes con esta afección. Para ello se realiza de forma continua las tomas de muestras bajo el método convencional como es la punción digital, que resulta ser incómodo e invasivo. Este tipo de métodos suscita cierta aversión en pacientes pediátricos y adultos, desencadenando fobias y resistencia a controles regulares. En ese contexto, se inicia el desarrollo de alternativas no invasivas, amigables y simplificadas como lo son los dispositivos para la medición de la glucosa a través del sudor.

La diabetes es una enfermedad crónica que afecta a la población a nivel mundial, y tiene repercusiones muchas veces irreversibles en la salud del ser humano. Se caracteriza por mantener niveles altos de glucosa en la sangre que altera significativamente al organismo.

Presenta un desarrollo sobre la fisiología del sudor y la glucosa, la tecnología de los sensores, los factores ambientales de la persona que padece la enfermedad, y los requisitos de precisión y exactitud.

El artículo presenta una revisión bibliográfica acerca de dispositivos para el control de los niveles de glucosa a través del sudor en personas diabéticas, estos se clasifican en Biosensores Colorimétricos Enzimáticos y Biosensores Electroquímicos no Enzimáticos.

Así también se plasma las diferentes investigaciones, tales como: Sensor de glucosa de sudor con parches de hidrogel (Lin et.al., 2022); Sensor flexible acoplado a dispositivo electrónico inalámbrico (Reséndiz 2021); Biosensor flexible portátil ultra pequeño para análisis continuo de sudor (Wang et al. 2022); Dispositivo integrado electroquímico microfluídico para detectar glucosa en sudor natural (Noura et al., 2022); Biosensor de glucosa basado en nano-hojuelas de óxido de zinc (Fulati y col. Citado en Ceballos-Camargo 2014). Estas investigaciones tienen la finalidad de medir el nivel de glucosa a través del sudor, como un método de control no invasivo.

Por último, la Ingeniería Biomédica persigue con ahínco perfeccionar, mejorar e innovar equipos y elementos útiles para la salud, que se caractericen de ser poco o nada invasivos a la integridad del paciente, entre ellos diseños portables del dispositivo y en diferentes presentaciones, como bandas, microchips, sensores de hidrogel, tatuajes, sensores infrarrojos, también existen dispositivos con la capacidad de almacenamiento de información de los niveles de glucosa de los

Citar como: Cusi Machaca, K. Dispositivos para control de glucosa a través del sudor en diabéticos. *Journal Boliviano De Ciencias*, 20(55). 102-106 <https://doi.org/10.52428/20758944.v20i55.1033>

Revisado: 22/11/2023

Aceptado: 14/05/2024

Publicado: 30/06/2024

Declaración: Derechos de autor 2024 Cusi Machaca, K., Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



usuarios. La funcionalidad, diseño y utilidad de dispositivos portátiles para el control de glucosa, aún se encuentran en proceso de investigación por diferentes casas superiores de estudio como la Universidad del Sur de California, con la investigación “Biosensores de transistores de nanocintas de In_2O_3 altamente sensibles y portátiles con puerta integrada en chip para monitoreo de glucosa en fluidos corporales” plantea medir el nivel de glucosa a través de lágrimas y sudor; por otro lado la Universidad de Valparaíso, con el Proyecto de Investigación “Sistema Móvil de monitoreo no invasivo y de gestión de enfermedades crónicas para pacientes afectados de diabetes” que propone la medición de glucosa, pulso periférico, creación de alarmas personalizadas para el usuario y almacenamiento de la información, este sistema disminuiría costos y mejoraría el control de los niveles de glucosa de forma no invasiva; así también la Facultad de Química dependiente de la Universidad Lomosov del Estado de Moscú, realizó una investigación acerca del “Monitoreo no invasivo de la diabetes a través del análisis continuo del sudor utilizando un biosensor de glucosa de flujo continuo” obteniendo resultados satisfactorios al conseguir mediante el registro en el biosensor del almacenamiento de la concentración adecuada de glucosa en el sudor y resultados inmediatos, lo que califica como un buen dispositivo para el monitoreo no invasivo de la diabetes.

1. INTRODUCCIÓN

La medición de la glucosa de la sangre es esencial para el diagnóstico y tratamiento de la diabetes. Sin embargo, la medición de la glucosa en sangre a través de un pinchazo en el dedo es incómoda y puede resultar en un bajo cumplimiento del paciente, ya que por lo general el control de glucosa es diario y someterse a los controles convencionales genera aversión y muchas veces desencadena fobias especialmente en la población infantil. Como resultado, se han desarrollado tecnologías no invasivas para medir la glucosa, incluyendo dispositivos para medir la glucosa a través del sudor.

La sudoración es un proceso fisiológico natural que ocurre en respuesta al calor o al ejercicio. El sudor contiene muchas sustancias químicas, incluyendo la glucosa. Los dispositivos para medir la glucosa a través del sudor utilizan sensores para medir la cantidad de glucosa en el sudor y proporcionan una medición de la glucosa en el cuerpo.

Esta alternativa de dispositivos que miden la glucosa a través del sudor, son prometedores porque no son invasivos, a comparación de los métodos tradicionales que implican la punción en el dedo. Cabe destacar que con este tipo de medición, se puede realizar pruebas y lecturas continuas, permitiendo el control de la glucosa de manera fácil, cómoda y precisa. Además, la medición de la glucosa a través del sudor puede proporcionar información sobre la respuesta del cuerpo a la actividad física y la dieta, lo que puede ser útil para el tratamiento de la diabetes.

Algunos de estos prototipos de dispositivos, se activan con la estimulación de la producción del sudor a través de la actividad física, y otros aprovechan el sudor en reposo. Entre sus ventajas, estos dispositivos presentan autonomía, almacenamiento de datos y la medición de la glucosa en tiempo real. Aunque la investigación en este campo está en curso, la introducción de dispositivos para medir la glucosa

a través del sudor podría representar un avance importante en el diagnóstico y tratamiento de la diabetes, así como en la mejora de la calidad de vida de los pacientes con diabetes.

LA DIABETES

La Organización Panamericana de Salud (OPS, 2012) afirma que la diabetes es considerada como un problema de salud pública debido a su alto impacto negativo en la calidad de vida del ser humano. Se caracteriza por ser una enfermedad crónica que ocurre cuando el páncreas deja de producir insulina o cuando el organismo humano no hace uso de la insulina de forma eficaz, esto provoca una hiperglucemia que al avanzar la diabetes los diferentes órganos, sistemas, nervios y vasos sanguíneos se ven gravemente afectados. La importancia de la *insulina* radica en el aporte de energía a las células del cuerpo, en personas diabéticas la insulina se deposita en el torrente sanguíneo y no en las células donde debería (Silos et al., 2021).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el año 2019, la diabetes paso a ser una de las 10 causas principales de mortalidad a nivel mundial. Por otro lado, la OPS en 2019 afirmó que la diabetes ocupa el sexto lugar como causa de muerte en el continente americano, según las estadísticas de la misma entidad fue responsable de más de 284.000 decesos en dicha gestión (Organización Mundial de la Salud, 2020)(Organización Panamericana de la Salud, 2023).

En cuanto a los tipos de diabetes, se pueden diferenciar 3: la diabetes tipo 1, diabetes insulino dependiente (defecto de uso o producción de insulina - común en niños), diabetes tipo 2, no insulino dependiente (incapacidad de uso correcto de la insulina) y la diabetes gestacional, se manifiesta durante el embarazo (Organización Panamericana de Salud, 2012) (Samaniego 2019).

El sudor está compuesto por una variedad de elementos, tales como metabolitos que transportan entre muchas otras a la glucosa, también está compuesto por ácido láctico, proteínas, enzimas.

Loayza-Martínez (2019), plantea una comprensión detallada de la fisiología del sudor y la relación entre la concentración de glucosa en el sudor y en la sangre es esencial para el diseño de un dispositivo para medir la glucosa a través del sudor, con base en ello Khor et al., (2021) destaca que al ser la glucosa uno de los principales metabolitos secretados por el sudor, éste se encuentra en menor concentración en el sudor que en sangre. Estas concentraciones son variables, en sangre hay una concentración de glucosa de 2 a $40 \cdot 10^{-3} \text{ M}$ a diferencia de la concentración de glucosa en el sudor que es de $0.01 - 1.11 \cdot 10^{-3} \text{ M}$.

De acuerdo con Lin et al. (2022), la sudoración podría ser considerada un elemento importante en un método de medición de los niveles de glucosa, ya que contiene toda la información necesaria para dicho examen. De la misma manera, Padash, Enz & Carrara (2020) Khor et al., (2021) coinciden con Lin et al. (2022) y agregan que se requiere una cantidad adecuada de glucosa en el sudor para su detección en los biosensores, que necesariamente deben ser altamente sensibles. Así también, De la torre Fraga & Mesa Alvarez (2016) citados en Reséndiz (2021) manifiestan que el sudor es un fluido que regula la temperatura corporal, que está compuesto por agua un 99% y por NaCl, K, Ca, Mg, Fe, urea, vitaminas, ácido láctico, aminoácidos, glucosa y colesterol.

TIPOS DE DISPOSITIVOS DE CONTROL DE GLUCOSA

Teniendo en cuenta que la diabetes es una de las enfermedades más comunes que afecta a la población mundial, se han realizado investigaciones y desarrollado múltiples dispositivos biosensores que permiten la detección de concentraciones de glucosa de manera no invasiva, a través de fluidos biológicos concentrados distintos a la sangre, uno de ellos es el *sudor*. Para ello es importante comprender su dinámica.

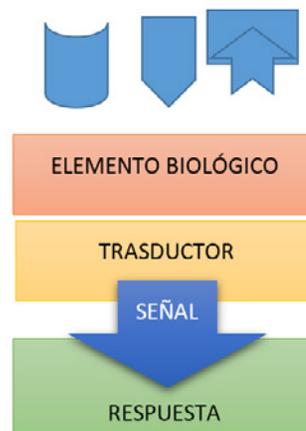
Para determinar los niveles de glucosa es necesario registrarla en ayunas bajo términos estándares: Hipoglucemia, se caracteriza por presentar niveles bajos de glucosa en la sangre por debajo de 70mg/dL. Por otro lado, la hiperglucemia presenta niveles elevados de glucosa en la sangre, también está la normoglucemia, que refiere niveles normales de glucosa en sangre dentro de mg/dL en ayunas y por último la prediabetes, presenta niveles de glucosa más altos de lo normal pero no lo suficiente para calificar como diabetes (Rigalleau et al., 2021) (Samaniego 2019) (American Diabetes Association, 2021).

El reto para los ingenieros biomédicos radica en diseñar un dispositivo y obtener datos exactos en relación al estado diabético del paciente. El diagnóstico se consigue mediante algoritmos o modelos de datos (Ramirez-Dominguez, Estrada-López & López-Huerta, 2022)

Ceballos-Camargo, et al. (2014) exponen el esquema básico que un biosensor debe cumplir para su diseño. De tal forma que pueda el sustrato pueda unirse al elemento biológico y se realice la tasa de conversión. **Figura 1**

FIGURA 1.

Esquema típico de un biosensor



Fuente: Ceballos-Camargo, et al. (2014)

Los dispositivos portátiles se clasifican según el bioreconocimiento y transducción de señal.

Tabla 1

Clasificación de dispositivos entre bioreconocimiento y transducción de señal

TIPOS	DETECTOR	CARACTERÍSTICAS	DESVENTAJAS
Biosensor Colorimétrico	Biosensor Enzimático	<ul style="list-style-type: none"> * Interpretación de señal de color RGB * El parche biosensado se reemplaza despues de cada uso *Costos operativos bajos * Monitoreo continuo a largo plazo de la glucosa 	Son altamente sensibles a los cambios en el ambiente del sudor, la degradación de la enzima con el tiempo, inmovilizacion de la enzima y por último altos costos.
Biosensor Electroquímico	Biosensor no Enzimático	<ul style="list-style-type: none"> *Análisis de glucosa sudorosa y Hardware inalámbrico de transmisión de datos * Trabajan bajo estabilidad y actividad electrocatalítica. * Costos operativos altos * Monitoreo continuo a largo plazo de la glucosa 	Requieren baterías y otros dispositivos electrónicos de soporte (PCB inalámbricos)

Nota: (Khor et al., 2022) (Lin et al., 2022)

Ahora bien, Khor et.al (2022) postulan que un biosensor portátil se debe caracterizar por ser totalmente autónomo, tener un diseño de estructura integral y sistema de diagnóstico confiable e inteligente.

En la Tabla 2, se describe una compilacion y clasificación TRL de los dispositivos bajo la bibliografía revisada.

Según SACSIS (2020), el nivel TRL es un acrónimo en inglés que significa “Technology Readiness Level” que traducido al español es “Nivel de Madurez Tecnológica”. Es una medida que describe la madurez de una tecnología, término usado comunmente en áreas de ingeniería, ciencia y gestión de proyectos.

Los TRL se clasifican en una escala del 1 al 9, que va de menor a mayor tecnología respectivamente.

Tabla 2
Tipos de Dispositivos Portátiles de Control de Glucosa

Investigadores	Dispositivo y Método de detección	Avance del Prototipo según TRL	Características	Método de muestreo
Lin et. al., (2022)	Sensor de glucosa de sudor con parches de hidrogel. Detección Cronoamperometría	Detección Electroquímica TRL 6	Absorción rápida del sudor durante actividades diarias, sedentarias y rutinarias en reposo	Sin Estimulación, rutinario.
Reséndiz (2021)	Sensor flexible acoplado a dispositivo electrónico inalámbrico	Detección Electroquímica TRL 4	Dispositivo electrónico tipo inalámbrico	Actividad Física
Wang et al. (2022)	Biosensor flexible portátil ultrapequeño para análisis continuo de sudor	Detección electroquímica TRL 6	Sistema miniatura , precisión en tiempo real.	Actividad física
(Noura et al., 2022)	dispositivo integrado electroquímico microfluídico para detectar glucosa en sudor natural	Detección Electroquímica TRL 5	Recolecta muestras a base de acción capilar en tiempo real.	Actividad Física.
Fulati y col. Citado en Ceballos-Camargo (2014)	biosensor de glucosa basado en nano-hojuelas de óxido de zinC	Detección Electroquímica TRL 4	Monitoreo continuo de la glucosa	Actividad Física
Karpova et al., (2019)	Monitoreo no invasivo de la diabetes a través del análisis continuo del sudor utilizando un biosensor de glucosa de flujo continuo	TRL 6	Análisis continuo del sudor sin diluir inmediatamente después de su excreción	Actividad Física

Nota: La clasificación según TRL Fuente: (Financiación e Investigación SACSIS, 2020)

Es así, que Pérez & Orozco (2022) proponen en su investigación la aplicación de Biosensores electroquímicos portátiles para medir biomarcadores con particiones complejas de sangre a sudor, como proteínas y hormonas. Estos dispositivos, tales como el Gluco Watch (Cygnus) es no invasivo y se basa en la iontoforesis inversa, también está el Panda “Glucohol” (glucosa más alcohol) tatuaje, luego menciona a los biosensores epidérmicos portátiles, estos requieren por lo menos tres electrodos para un alto rendimiento y estabilización del sistema del sensor con el tiempo, otra alternativa son los biosensores epidérmicos portátiles en electrodos serigrafados.

Ceballos-Camargo (2014) recopilaron información de biosensores electroquímicos de glucosa, quienes mencionan a Fulati y colaboradores que crearon un biosensor de glucosa basado en nano-hojuelas de óxido de zinc, la dinámica consiste en un monitoreo continuo de la glucosa a lo largo del día.

Por otro lado, un proyecto de investigación de la Carrera de Ingeniería Civil Biomédica de la Universidad de Valparaíso plantea un sistema de monitoreo de los niveles de glucosa en la sangre, a través de métodos ópticos utilizando diodos emisores y receptores en frecuencias de infrarrojo cercano; se pretende relacionar esta información a un dispositivo portátil de 24 horas de uso conectado a un teléfono móvil del usuario y generar una base de datos. Este tipo de dispositivos serían de gran ayuda para mantener el historial de salud de los pacientes en tiempo real.

Así mismo, Reséndiz (2021) menciona que la glucosa es un compuesto biológico, reactivo principal en la glucólisis. Y que se fueron desarrollando varias formas de estudiar y medir el nivel de la glucosa y la detección de diabetes. Es por ello se encuentra una relación estrecha entre sudor y los niveles normales de glucosa que pueden ser de 5 a 20 mg/dL, los diabéticos generalmente exceden los 100 mg/dL de concentración de glucosa en el sudor.

En cuanto a la tecnología utilizada para la fabricación de sensores, los dispositivos deben ser sensibles y específicos para la medición de la glucosa en el sudor. Los sensores electroquímicos y los biosensores son comúnmente utilizados para la medición de la glucosa en el sudor.

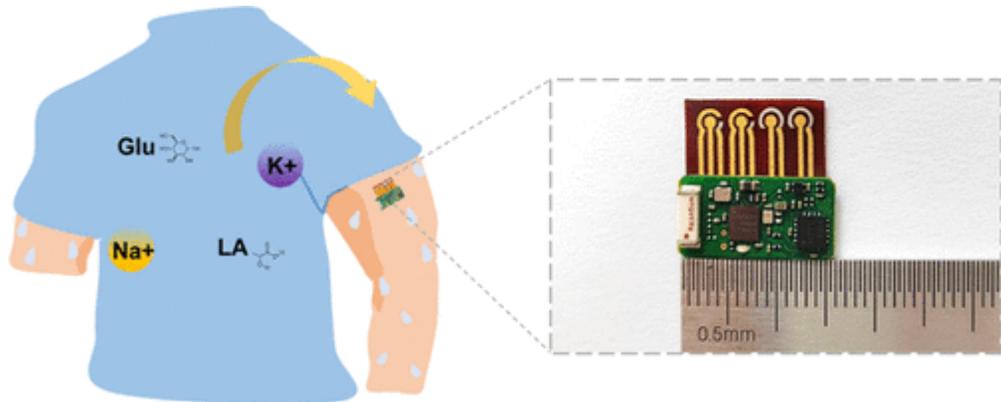
Existen dispositivos portátiles no invasivos, como los sensores portátiles para medir la glucosa en el sudor y el Dispositivo Sensor de Glucosa Óptica basado en VIS-NIR (Detectores dentro de rango visible e infrarrojo cercano) Se caracterizan por aprovechar el sudor y cuantificar el nivel de azúcar en el organismo. (Hernández & Hernández, 2023)

Citando a Karpova et. Al. (2014) describen el Biosensor de Glucosa de Flujo Continuo desarrollado en su investigación, se basan en el azul prusiano y la glucosa oxidasa inmovilizada en ionómero perfluorosulfonado, la sensibilidad alcanza en modo por lotes $0.23 \text{ AM}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ y su rango de calibración es de $5 \mu\text{M}$ a 1 mM . Se aplicó la investigación en una población muestra de 19 voluntarios bajo regulaciones de GCP (Buenas Prácticas Clínicas, en español), y se determinó que el monitor, es un dispositivo ultrasensible.

Wang et al. (2022) sugieren implementar biosensores pequeños y portátiles con chip MSO2 integrado, para la detección inmediata del sudor y monitorear de esta manera la glucosa tanto valores normales como anormales (**Figura 2a**). Los componentes utilizados para el diseño de estos biosensores son: electrodos flexibles (**Figura 2b**), placa circular impresa de $1.5 \text{ cm} * 0.8 \text{ cm}$.

Figura 2a.

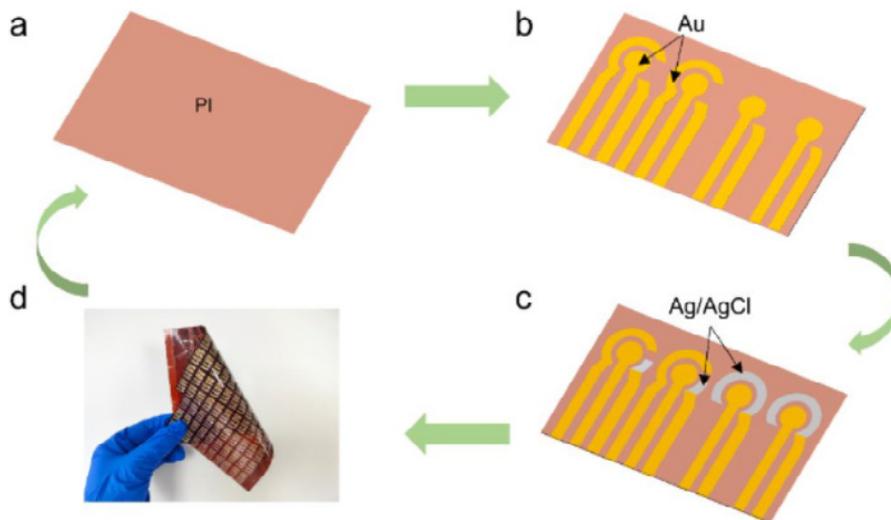
Biosensor Portátil con Chip MS02



Fuente: Wang et al. (2022)

Figura 2b.

Electrodo Flexible de Biosensor Portátil con Chip MS02

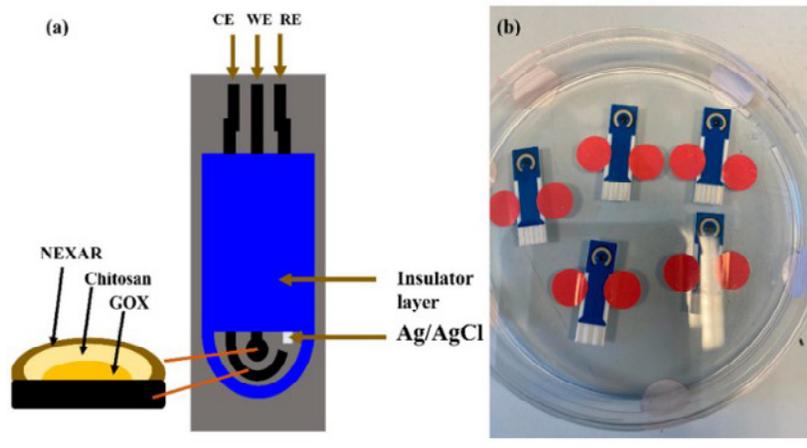


Nota. Pasos de fabricación de los Electrodo Flexible (a) Poliamida (Pi) sustrato para la impresión de patrones (b) Impresión de patron de Au como electrodo de trabajo y contraelectrodos en Pi (c) Impresión de electrodos de Ag/AgCl en Pi (d) Fotografía de la matriz de electrodos. Fuente: Wang et al. (2022)

Una propuesta similar con algunas diferencias nos enseñan (Noura et al., 2022) quienes diseñaron un dispositivo integrado electroquímico microfluídico basado en papel 3D PMED (Particle Mediated Epidermal Delivery) para detectar los niveles de glucosa en el sudor en tiempo real, un equipo nada invasivo (**Figura 3**). Los elementos usados para la fabricación de este dispositivo fueron: electrodos de carbono serigrafiados, malla de pantalla, cera y papel filtro Whatman. Se realizaron mediciones amperométricas a temperatura ambiente. Cabe destacar, que las pruebas se llevaron a cabo inicialmente fuera del cuerpo para verificar la capacidad de detección de glucosa en un simulacro de sudor, posteriormente una vez confirmados los resultados, se aplicó el instrumento de medición directamente en el cuerpo humano, específicamente en el antebrazo de los voluntarios, ya que en esa zona se encuentran las glándulas écrinas secretoras de glucosa en el sudor. Una vez el dispositivo inició la evaluación, se midió 1.5 mM a 0.4 mM de glucosa y sudor (**Figura 4**).

Figura 3

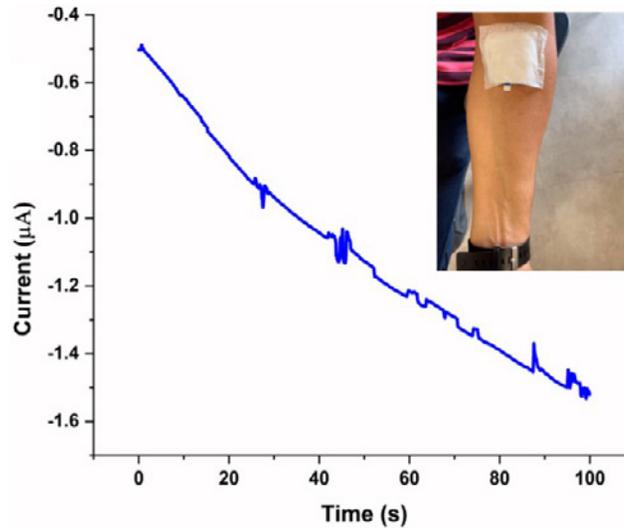
Caracterización del Sensor de Glucosa



Nota. (a) Diagrama esquemático del sensor de glucosa (b) Electrodo sensor de glucosa, recubierto con cinco capas. Fuente: Noura et.al. (2022)

Figura 4

Instalación de Sensor de Glucosa en Antebrazo de Voluntario



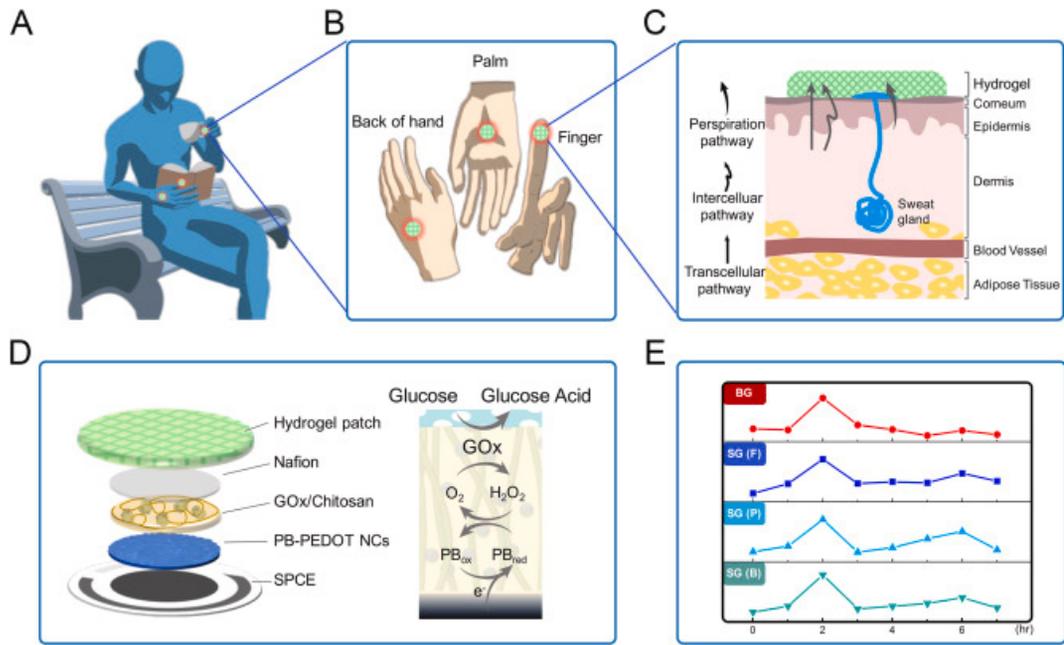
Nota. Instalación y medición corporal de glucosa en el sudor con el 3D PMED.

Fuente: Noura et al. (2022)

Por otro lado (Lin et al., 2022) también realizaron investigaciones con un parche hidrogel portatil, consta de un electrodo de poli (3,4-etilendioxitiofeno nanocomposito (PB-PEDOT NC) con sensor de glucosa electroquímico a través del sudor natural (**Figura 5**). Su propuesta se basa en los la recolección de analitos por los parches de hidrogel y dirigirlos al biosensor de áreas con alta densidad de glándulas del sudor. Este dispositivo tiene una marcada mejora frente a la sensibilidad de glucosa. La valoración se puede obtener de un dedo, palma o el dorso de la mano.

Figura 5

Esquema del diseño, mecanismo y uso del sensor de glucosa de muestreo natural del sudor:



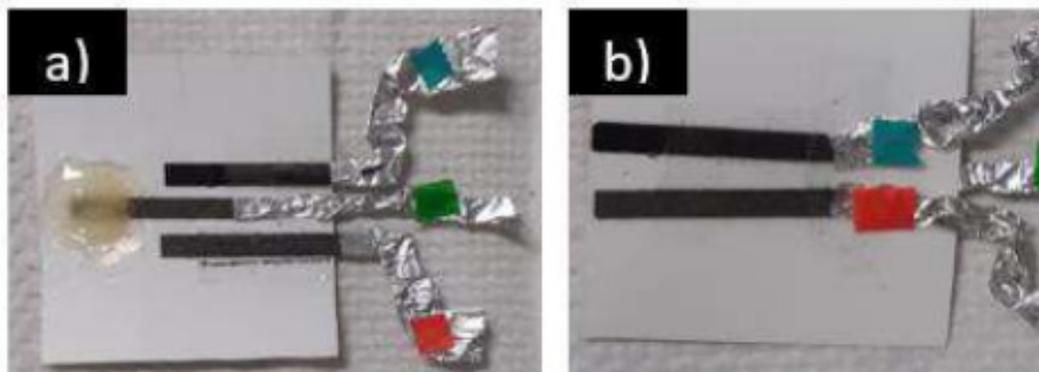
Nota. **A.** Uso del parche hidrogel. **B.** Posiciones accesible. **C.** Vías de glucosa para muestreo. **D.** Esquema de capas del electrodo enzimático del sensor de glucosa. **E.** El dispositivo puede controlar la glucosa en el sudor sin actividad de alta intensidad o estimulación externa en diferentes posiciones, como dedo (F), palma (P) y dorso de la mano (B). **Fuente:** Lin et al. (2022)

A diferencia de Wang et al. (2022) y Noura et al. (2022) quienes diseñaron sus dispositivos para obtener los niveles de glucosa, estimulando el sudor a través de la actividad física; Lin et al. (2022) enfatizan su investigación en aplicar el dispositivo a personas con actividades rutinarias para mantener la relación existente entre sangre y la glucosa del sudor, es decir realizaron su investigación a un determinado grupo de personas sin activarlos físicamente.

Por otro lado, Reséndiz (2021) destaca otro dispositivo mejorado, este consta de un biosensor inalámbrico que mide los niveles de la glucosa a través del sudor. Dicho dispositivo se diferencia de otros al ser totalmente autónomo para realizar las mediciones en tiempo real y almacenar la información. Se caracteriza por el uso de tres electrodos: electrodo de trabajo (de papel carbon de Toray) el contra electrodo (barra de carbón grafito) y el electrodo de referencia, estos se depositan sobre un parche médico (Figura 6). Y para obtener el nivel de glucosa se integra el potencióstato en la parte electrónica.

Figura 6

Biosensor de glucosa tipo parche



Nota. (a) Biosensor con electrodo de referencia Ag/AgCl con cubierta de resina epóxica.

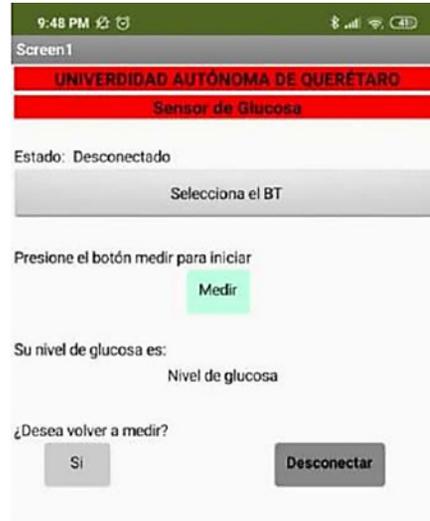
(b) Biosensor con electrodo de referencia Ag/AgCl con diseño de puente salino.

Fuente: Reséndiz (2021)

El diseño de este dispositivo que propone Reséndiz además de realizar las mediciones del nivel de glucosa, almacena los datos obtenidos, que son detalles que la Ingeniería biomédica valora en la actualidad (**Figura 7**). Para ello el diseño electrónico es fundamental, se basa en un módulo Esp32 con un DAC (convertidor de digital a analógico) de 8 bits y un ADC (convertidor de analógico a digital) de 12 bits, lleva integrado el wifi y bluetooth. Posteriormente para el procesamiento de datos se convierte la señal analógica a digital en el programa Python y se reajusta la resolución a 12 mV/escalón. Por último se enlaza con la aplicación móvil y se da clic en “iniciar” para dar la orden de inicio de pruebas electroquímicas, y así se obtiene el valor de glucosa en el sudor y la aplicación va almacenando la información.

Figura 7

Interfaz para aplicación en teléfono inteligente



Nota. Aplicación para almacenamiento de datos obtenidos del Biosensor de Glucosa. Fuente: Reséndiz (2021)

Factores ambientales de la persona afectada por la diabetes como ser: la actividad física, la dieta, la hidratación y la temperatura ambiental pueden influir en la concentración de glucosa en el sudor y, por lo tanto, en las mediciones de glucosa en el dispositivo. Así también, influyen los factores fisiológicos tales como el estrés emocional, concentración de metabolitos, el pH de la piel que pueden afectar la transpiración y la precisión del dispositivo.

Wang et al., Noura et al. & Reséndiz mencionan diferentes características que se tomó en cuenta en sus respectivas investigaciones, como la temperatura corporal, la actividad física, el reposo, la dieta e hidratación.

Se espera que los dispositivos para medir la glucosa a través del sudor deban cumplir con requisitos de precisión y exactitud para garantizar mediciones confiables y precisas. (Tabla 3)

Hernández & Hernández (2023) describen la capacidad de los dispositivos para analizar los datos del nivel de glucosa de forma continua y sostienen que la tecnología de los biosensores es prometedora ya que extenderá los informes de glucosa del sudor ecrino humano pasivamente en tiempo real. Por otro lado ratifican el objetivo principal de las técnicas de medida de glucosa, es reducir el error al momento de la detección de hipoglucemia e hiperglicemia.

Pérez & Orozco (2022) expresan que los dispositivos deben realizar las mediciones fisiológicas manteniendo un contacto estrecho con la superficie del cuerpo.

Tabla 3

Características de los dispositivos de medición de la glucosa a través del sudor

Investigadores	Dispositivo y Método de detección	Características
Lin et. al., (2022)	Sensor de glucosa de sudor con parches de hidrogel. Detección Cronoamperometría	Tiempo de muestra rápida, mediante absorción de sudor natural de la mano
Reséndiz (2021)	Sensor flexible acoplado a dispositivo electrónico inalámbrico	Aplica voltaje del pico de oxidación durante 5 minutos y calcula el valor de la glucosa en unidades milimolares posteriormente la envía a la APP transformando la medida en mg/dL
Wang et al. (2022)	Biosensor flexible portátil ultrapequeño para análisis continuo de sudor	Medición en tiempo real. Monitoreo de 4 biomarcadores (glucosa, lactato, Na ⁺ , y k ⁺)
(Noura et al., 2022)	Dispositivo integrado electroquímico microfluídico para detectar glucosa en sudor natural	Monitoreo continuo en tiempo real. Dispositivo microfluídico basado en papel (3D PMED). Con sensibilidad de 16.8 ATHA/mM/cm ²
Fulati y col. Citado en Ceballos-Camargo (2014)	Biosensor de glucosa basado en nano-hojuelas de óxido de zinC	Monitoreo continuo de la glucosa . El ZnO es compatible con elementos biológicos y tiene una alta tasa de transferencia de electrones
Karpova et al., (2019)	Monitoreo no invasivo de la diabetes a través del análisis continuo del sudor utilizando un biosensor de glucosa de flujo continuo	La respuesta del biosensor permanece constante durante 25 horas

CONCLUSIONES

Se estudió 6 dispositivos de medición del nivel de glucosa en esta investigación, los cuales en comparación con el método de control convencional como lo es la punción digital, no son nada invasivos, ya que no requieren se realice punciones generalmente en la yema de los dedos y obtener la gota de sangre para su evaluación, método que es poco tolerado por los niños o personas que sufren ansiedad con un umbral alto de dolor, lo que finalmente se convierte en una pesadilla ya que este

tipo de monitoreos debe ser constante y muchas veces las personas resienten este procedimiento negándose a continuar con ello, generando así problemas de salud al no estar debidamente controlados.

Evaluando los estudios revisados, el dispositivo que califica como accesible, interesante y práctico es el *Sensor de glucosa de sudor con parches de hidrogel* que proponen Lin et al. (2022), ya que para la detección del nivel de glucosa en el sudor no requiere estimulación de sudoración mediante actividad física sino obtiene la muestra mediante activades rutinarias además de tener un nivel 6 de TRL. Por otro lado, el *Biosensor flexible portátil ultrapequeño para análisis continuo de sudor* de Wang et al. (2022) se destaca por ser un dispositivo avanzado, con la característica de tener una presentación miniatura, portátil y de precisión en la medida de la concentración de glucosa en tiempo real destacando también un nivel 6 de TRL. No obstante, del mismo modo llama la atención el *Sensor flexible acoplado a dispositivo electrónico inalámbrico* que postula Reséndiz (2021) por no ser solo un dispositivo de control inmediato si no también tiene la particularidad de almacenar la información en una base de datos, y disponerla en una aplicación móvil super práctica, este dispositivo presenta un nivel 4 TRL siendo el dispositivo con menor avance. Así también Noura et al., (2022), Fulati y col. Citado en Ceballos-Camargo (2014), Karpova et al., (2019) y otros autores desarrollaron dispositivos bastante innovadores y funcionales.

Por consiguiente el dispositivo que se recomienda como el ideal entre todos los dispositivos revisados es el *Biosensor flexible portátil ultrapequeño para análisis continuo de sudor* de Wang et al. (2022), el cual a diferencia de los demás dispositivos es totalmente autónomo para realizar mediciones en tiempo real y almacenar la información de manera eficiente, lo que lo posiciona como una herramienta avanzada y prometedora para el monitoreo no invasivo de la diabetes. Se destaca además, por su diseño innovador que integra tres electrodos (electrodo de trabajo, contra electrodo y electrodo de referencia) sobre un parche médico, junto con la inclusión de un potencióstato en la parte electrónica para medir los niveles de glucosa a través del sudor. Asimismo, este biosensor es capaz de almacenar los datos obtenidos, lo que lo convierte en una opción completa y funcional para el control continuo y preciso de la glucosa en pacientes diabéticos. Su nivel de tecnología, representado por un TRL 6, indica un avance significativo en su desarrollo y lo posiciona como una herramienta confiable y efectiva para el monitoreo no invasivo de la diabetes.

Es así como uno de los grandes desafíos de la ciencia en medicina es proveer dispositivos poco invasivos de monitoreo de glucosa en personas con diabetes y una buena opción es un dispositivo amigable, accesible de detección de los niveles de glucosa en base al sudor en tiempo real.

Estudios científicos demostraron que el *sudor* contiene información valiosa sobre la concentración del nivel de glucosa, detalle que hace que la medición a través de este fluido corporal sea una opción favorable.

La ingeniería biomédica, en el área de innovación tecnológica se enfrenta a una variedad de desafíos. Destacando la necesidad de: crear, implementar, mejorar el diseño y fabricación de los dispositivos de control de glucosa en el sudor, esto implica tomar en cuenta tres pilares fundamentales para el desarrollo de la “piel inteligente”, la microfabricación de semiconductores, electrónica blanda y los sensores robóticos (Perez & Orozco 2022). Otra de las mejoras que se espera de

estos dispositivos portátiles, es cumplir con el monitoreo continuo por periodos largos, también es menester desarrollar biosensores de tamaño reducido, selectivos y confiables.

Si bien es cierto, el desarrollo de este tipo de dispositivos de control glucémico va en tendencia y en constante evolución, los mismos requieren cumplir reglamentaciones, controles de calidad y las certificaciones correspondientes, esto con el propósito de regular la seguridad clínica a los pacientes.

El desarrollo de estos dispositivos tiene el potencial de mejorar la calidad de vida de las personas con diabetes.

BIBLIOGRAFÍA

American Diabetes Association. (2021). Classification and Diagnosis of Diabetes: Standards of Medical Care in Diabetes—2021. *Diabetes Care*, 44(1).

Ceballos-Camargo, L., Narro, R., Sandoval, J. (2014) Biosensores electroquímicos de glucosa. *CienciaCierta.10* (39). <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2014/09/06/biosensores-electroquimicos-de-glucosa/>

Financiación e Investigación SACSIS. (2020, 3 de Junio). Los niveles TRLs en el sector de dispositivos médicos. <https://financiacioneinvestigacion.com/blog/niveles-trls-dispositivos-medicos/>

Karpova, E., Shcherbacheva, E., Galuchin, A., Vokhmyanina, D., Karyakina, E., Karyakin, A. (2019) Monitoreo no invasivo de la diabetes a través del análisis continuo del sudor utilizando un biosensor de glucosa de flujo continuo. *Analytical Chemistry. Chemistry Faculty. 6* (91) 3778-3783. Russia. Recuperado de <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.analchem.8b05928>

Khor, S. M., Choi, J., Won, P., & Ko, S. H. (2022). Challenges and Strategies in Developing an Enzymatic Wearable Sweat Glucose Biosensor as a Practical Point-Of-Care Monitoring Tool for Type II Diabetes. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 12(2), 221. <https://doi.org/10.3390/nano12020221>

Hernández, D., & Hernández, J. (2023). Dianetes, Inteligencia Artificial e Internet de las cosas médicas: nuevas tendencias en la medicina. *Komputer Sapiens*, 1, 41-64.

Lin, P., Sheu, S., Chen, C., Huang, S., & Li, B. (2022). Wearable hydrogel patch with noninvasive, electrochemical glucose sensor for natural sweat detection. *Talanta*, 241(1), 123187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.123187>

Liu, Q., Liu, Y., Wu, F., Cao, x., Li, Z., Alharbi, M., Abbas, A.N., Amer, M.R. & Zhou Ch. (2018) Altamente sensible y portátil In₂O₃ Biosensores de transistores de nanoribbono con puerta integrada en el chip para el monitoreo de glucosa en fluidos corporales. *ACS Nano*, 12 (2) 1170-1178. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b06823>

Loaiza-Martinez, M. D. L. (2019). Diseño del proyecto para construir un dispositivo no invasivo de control de glucosa (Master's thesis). Recuperado de <https://reunir.unir.net/handle/123456789/8165>

Noura, Z., Shah, I., Aziz, S., Ahmed, A., Jung, D., Brahim, L., & Elmostafa, R. (19 de Noviembre de 2022). Wearable Healthcare Monitoring Based on a Microfluidic Electrochemical Integrated for Sensing Glucose in Natural Sweat. *Sensors (Basel)*, 22(22), 8971. <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/22/8971>

Organización Mundial de la Salud (2019). Diabetes. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/diabetes>

OMS. (2020). *Las 10 principales causas de defunción*. Organización Mundial de La Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death#:~:text=Las infecciones de las vías,460.000 menos que en 2000>

- Organización Panamericana de Salud. (27 de abril de 2012). Diabetes. Organización Panamericana de Salud: https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=category&id=4475&layout=blog&Itemid=40610&language=es&limitstart=15
- OPS. (2023). *Diabetes*. Organización Panamericana de La Salud. <https://www.paho.org/es/temas/diabetes>
- Padash M, Enz C, Carrara S. Microfluidics by Additive Manufacturing for Wearable Biosensors: A Review. *Sensors* (Basel). 2020 Jul 29;20(15):4236. doi: 10.3390/s20154236. PMID: 32751404; PMCID: PMC7435802.
- Pérez, D., & Orozco, J. (2022). Wearable electrochemical biosensors to measure biomarkers with complex blood-to-sweat partition such as proteins and hormones. *Microchim Acta*, 189(127). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00604-022-05228-2>
- Ramírez-Domínguez, S.E., Estrada-López, J.J., López-Huerta, F. (2022). Métodos no invasivos de detección de glucosa para el tratamiento y diagnóstico de diabetes. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*. 10 (57) 65-76. https://riiit.com.mx/apps/site/files_v2450/glucosa_ver_5_div_jul-ago_2022_v1.pdf
- Reséndiz, A. (2021). Desarrollo de un sensor inalámbrico flexible para la cuantificación de glucosa en sudor (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro. <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/3541/1/IGLIN-257406-1121-622-Ariadna%20Yaneli%20Resendiz%20Jaramillo%20%20%20-A.pdf>
- Reyes, P. Blanchard, G., Arredondo, T., Galindo, C., Glaría, A., Roncagliolo, P., Aguirre, L., Jara, A. (2011). Sistema móvil de monitoreo no invasivo y de gestión de enfermedades crónicas para pacientes afectados de diabetes. Proyecto de Investigación no publicado. Universidad de Valparaíso, Chile. Recuperado de https://www.conicyt.cl/wp-content/themes/fondef/encuentra_proyectos/PROYECTO/06/I/D06I1094.html
- Rigalleau, V., Monlun, M., Foussard, N., Blanco, L., Mohammadi K. (2021) Diagnóstico de Diabetes. *EMC-Tratado de medicina*, 25 (2) 1-7. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/S1636-5410\(21\)45110-X](https://doi.org/10.1016/S1636-5410(21)45110-X)
- Samaniego Bañuelos, F. (2019). ¿De qué diabetes estamos hablando?.. Editorial ITACA. <https://elibro.net/es/lc/bibliounivalle/titulos/120365>
- Silos Chincoya, G., Martínez Oliva, G. G., & Chairez Oria, J. I. (2021). Dispositivo de Monitoreo de Glucosa en Sangre No Invasivo mediante Infrarrojo Cercano. *Memorias Del Congreso Nacional De Ingeniería Biomédica*, 8(1), 173–177. Recuperado a partir de <https://memoriascnib.mx/index.php/memorias/article/view/890>
- Wang, J., Wang, L., Li, G., Yan, D., Liu, C., Xu, T., & Zhang, X. (2022). Ultra-Small Wearable Flexible Biosensor for Continuous Sweat Analysis. *ACS Sens*, 10(3), 3102-3107. <https://doi.org/10.1021/acssensors.2c01533>. Epub 2022 Oct 11. PMID: 36218347.