



PUBLICACIONES DE LA
ACADEMIA NACIONAL DE
MEDICINA DE MÉXICO

FÍSICA Y MEDICINA

Coordinador:
Dr. Víctor M. Castaño Meneses

SALUD: LA NECESIDAD DE UNA APROXIMACIÓN METADISCIPLINARIA

DR. VÍCTOR M. CASTAÑO MENESES

CENTRO DE FÍSICA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA DE MÉXICO
ACADEMIA DE INGENIERÍA MÉXICO
ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS



Históricamente, la Física y la Medicina han mantenido estrechas relaciones. En efecto, Hipócrates (c. 460 a.C. - c. 370 a.C.) describió diversos métodos para medir la temperatura corporal usando telas impregnadas con arcillas (por cierto, sabemos ahora que son materiales nanoestructurados). Santorio Santorio (1561-1636) inventó la Silla que lleva su nombre, donde trabajó, comió y durmió por más de 30 años, logrando un registro único y pionero sobre la medición de diversos parámetros físicos y su relación con metabolismo y salud. Leonardo da Vinci (1452-1519) fue, además de un gran artista e inventor, un precursor de la anatomía científica y, aunque no construyó un robot propiamente dicho, sus bocetos de inyección de cera líquida para visualizar ventrículos cerebrales son pioneros en la anatomía estructural. El hallazgo de los Rayos X, por el físico Wilhelm Roentgen (1845-1923) abrió, literalmente, una nueva época en el diagnóstico clínico. Ni que decir del descubrimiento de dos grandes físicos, Francis Crick (1916-2004) y Maurice Wilkins (1916-2004) que, en conjunto con el biólogo James Watson (1916-2004) y la físicoquímica Rosalind Franklin (1920-1958), dieron inicio a una nueva era de la Medicina con la determinación de la estructura del ADN. El día de hoy, más y más desarrollos y descubrimientos de la Física están encontrando importantes aplicaciones en la Medicina.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la salud se define como un estado de completo bienestar físico, mental y social y no solamente la ausencia de afecciones o enfermedades **(1)**. Este concepto integral implica que la salud debe incluir no sólo una filosofía remedial sino preventiva, lo que requiere, necesariamente, la metrología y análisis de variables físicas que, afortunadamente, cada día están más a disposición de los médicos del mundo.

Los avances tecnológicos han impactado a lo largo de la Historia, la práctica médica y, como puede observarse en la Figura 1 (construcción propia, a partir de documentos de Ref. 2) documentos, la famosa consultora Frost & Sullivan, en su importante estudio Pharma 4.0 **(2)**, contempla varias importantes contribuciones a la Medicina de la Física, particularmente Fotónica, Nanotecnología y Metrología, en el muy cercano futuro.

Un aspecto, empero, que Pharma 4.0 no menciona es el de la Ética y la Bioética de la Medicina a la luz de las nuevas tecnologías física, particularmente la ingeniería y la inteligencia organoide **(3)**, que está ya planteando dilemas no sólo teóricos y académicos, sino prácticos y legales.

Otro tema emergente que Pharma 4.0 también omite es el de los organoides, estructuras tridimensionales simplificadas de órganos, cultivadas in vitro a partir de células madre (pluripotentes), que permiten mimetizar la estructura biológica y la funcionalidad básicas de tejido real. Se consideran, ya, fundamentales para probar fármacos y para la medicina regenerativa. Se han desarrollado miniórganos de cerebro, riñón, hígado y pulmón, entre otros, lo que abre otra era nueva en Medicina.

En este contexto, la Academia Nacional de Medicina de México (ANMM) organizó el Simposio “Física y Medicina”, el día 29 de abril de 2026, en su sede del Centro Médico Nacional, con la participación de destacados expertos en diversos aspectos de la aplicación de la Física a la Medicina, desde biomecánica y microdispositivos flexibles, hasta nanotecnología y sus diversas aplicaciones médicas, pasando por robótica e

inteligencia artificial. Una profunda reflexión sobre los encuentros y desencuentros éticos y bioéticos entre Física y Medicina fue también parte del evento de la ANMM.

El llamado de este Simposio ha sido doble. Primero, el presentar los más recientes avances de las Ciencias Físicas que tienen, o tendrán muy pronto, aplicaciones relevantes en la Medicina, desde una perspectiva mexicana, es decir, cómo estamos posicionados en nuestro país para participar, de manera activa y efectiva, en esta revolución tecnológica que ya se está atestiguando en la práctica médica. Segundo, que se requiere trascender las limitaciones epistemológicas de las diferentes disciplinas que concurren en la práctica médica incluyendo, por supuesto, la Física. No se trata simplemente de presentar físicos con médicos y conminarlos a trabajar en equipo, sino que es menester

el que se generen nuevos paradigmas sobre cómo atender la Salud (dentro del amplio concepto de la OMS) de una forma integral, no solamente curando enfermos, sino previniendo que los sanos se enfermen. En este sentido, los problemas urgentes que la Humanidad enfrenta ya, no distinguen dónde termina la Medicina, dónde empieza la Física y en qué momento participan la Economía, la ética, la Bioética, la Sociología, la Antropología, etc., etc. No se trata, de ninguna manera, de preparar “expertos en todo”, sino de preparar los profesionales capaces de enfrentar retos integra y sinérgicamente en esta nueva Era. No bastan, en suma, la multidisciplinaria ni la interdisciplinaria (4), es hora de pensar en METADISCIPLINAS y la Medicina ofrece un crisol único para esta revolución ética, bioética y epistemológica. El gran pasado de la ANMM permite las bases de un gran futuro.

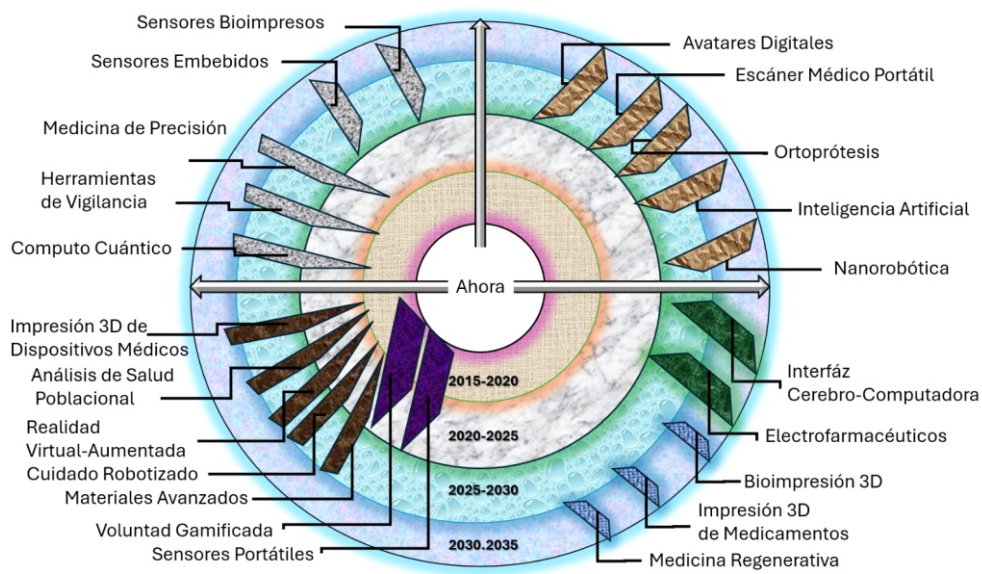


Figura 1.-Nuevas tecnologías y Medicina (2)

Referencias

- 1.- <https://www.who.int/es/about/frequently-asked-questions#:~:text=En%20el%20pre%3%A1mbulo%20de%20la,ausencia%20de%20afecciones%20o%20enfermedades.%C2%BB>. Consultado mayo 4, 2026
- 2.- <https://www.frost.com/analytics/industry/transforming-healthcare-old/pharma-4-0/#:~:text=Frost%20%20Sullivan's%20Pharma%204.0%20Research,companies%20to%20maximize%20operational%20excellence>. Consultado mayo 4, 2026
- 3.- D. Caraballo, V.M. Castaño, F. Villanueva y R. García From Brain Organoids to Organoid Intelligence: Benefits and Ethical-Moral Framework, Curr. Stem Cell Rep. 11, 11, <https://doi.org/10.1007/s40778-025-00251-4> (2025)
- 4.- <https://www.uu.nl/en/education/educational-development-training/knowledge-dossiers/interdisciplinary-education-and-cel/multi-inter-and-transdisciplinarity-what-is-what>

EL MOVIMIENTO HUMANO COMO SISTEMA FÍSICO-BIOLÓGICO: FUNDAMENTOS PARA UNA BIOMECÁNICA INTEGRADORA Y UNIVERSAL

DR. LUIS ÁNGEL ORTIZ LANGO

LABORATORIO NACIONAL CONAHCYT EN BIOMECÁNICA DEL CUERPO HUMANO, CIATEC A.C.
LORTIZ@CIATEC.MX



Resumen.

El estudio del movimiento humano ha estado históricamente basado en modelos centrados en patologías o poblaciones específicas, lo que ha limitado la generalización del conocimiento biomecánico. Este trabajo propone un cambio de paradigma que concibe al cuerpo humano como un sistema físico-biológico dinámico gobernado por principios universales de la mecánica, la termodinámica y la mecánica de materiales. Bajo este enfoque, parámetros como la rigidez musculoesquelética, la distribución de cargas articulares, la eficiencia del ciclo estiramiento-acortamiento, la absorción de impacto y la estabilidad dinámica del centro de masa representan propiedades transversales aplicables a distintos contextos clínicos, deportivos y ambientales. La integración de revisión sistemática, experimentación biomecánica, simulación musculoesquelética y modelado numérico multiescala permite construir un modelo explicativo del movimiento humano con aplicaciones en deporte de alto rendimiento, rehabilitación, diseño de dispositivos de asistencia y adaptación del cuerpo humano a diferentes entornos.

Palabras clave: biomecánica; movimiento humano; sistema físico-biológico; parámetros biomecánicos.

La biomecánica contemporánea ha alcanzado un alto grado de sofisticación técnica gracias al uso de tecnologías como la captura de movimiento tridimensional, plataformas de fuerza, electromiografía de superficie e inteligencia artificial, las cuales han ampliado significativamente la capacidad de analizar el movimiento humano. Sin embargo, este avance no ha sido acompañado por una integración conceptual equivalente, ya que la investigación biomecánica

continúa organizada principalmente alrededor de enfermedades, disciplinas deportivas o poblaciones específicas, generando modelos y protocolos particulares para cada condición. Aunque este enfoque ha producido una amplia cantidad de conocimiento, también ha derivado en una visión fragmentada del movimiento humano, dificultando la identificación de principios biomecánicos de carácter general y la comparación sistemática entre poblaciones y contextos. En consecuencia, se limita el desarrollo de herramientas de evaluación aplicables transversalmente, desde el rendimiento deportivo hasta el diseño de órtesis y prótesis. Ante este panorama surge una pregunta fundamental: ¿es posible identificar principios biomecánicos universales capaces de describir el comportamiento del sistema humano en movimiento independientemente de la condición del sujeto o del entorno de aplicación?

La física ofrece una base sólida para entender el movimiento humano como un sistema mecánico gobernado por principios universales. El cuerpo humano puede describirse como un conjunto de segmentos articulados, tejidos elásticos y flujos de energía que obedecen leyes físicas bien conocidas: las leyes de Newton explican la dinámica del movimiento, la mecánica de materiales describe el comportamiento del tejido óseo bajo carga, la reología caracteriza la viscoelasticidad de los tejidos blandos y la hidrodinámica permite entender la locomoción acuática. Desde esta perspectiva, condiciones como la enfermedad, el entrenamiento deportivo, el uso de prótesis o la microgravedad no representan sistemas distintos, sino diferentes condiciones aplicadas sobre el mismo sistema físico-biológico. Lo que cambia no son los principios físicos, sino los valores de los parámetros que describen su funcionamiento.

Bajo esta perspectiva, las diferentes condiciones en que el movimiento humano puede estudiarse: enfermedad, lesión, entrenamiento, prótesis, microgravedad son, en sentido estricto, condiciones de contorno distintas impuestas sobre el mismo sistema dinámico. La enfermedad de Parkinson altera los parámetros de control del sistema nervioso central, modificando la rigidez articular funcional y la economía de la marcha. Una amputación transtibial suprime un elemento elástico del sistema músculo-tendinoso distal y redistribuye las cargas hacia los segmentos proximales. El entrenamiento de fuerza modifica la pendiente de la relación fuerza-velocidad del músculo, alterando la potencia disponible en distintos rangos del movimiento. La microgravedad elimina la carga gravitacional sobre el esqueleto axial, reduciendo progresivamente la rigidez funcional del sistema óseo. En todos los casos, los principios físicos subyacentes son los mismos; lo que cambia son los valores que adoptan los parámetros del sistema.

Si el movimiento humano obedece a principios físicos universales, es posible identificar un conjunto de parámetros biomecánicos que describan el comportamiento del sistema de manera transversal. La propuesta aquí desarrollada articula cinco grupos de parámetros con capacidad explicativa universal. El primero es la rigidez musculoesquelética efectiva, entendida como la relación entre la fuerza de reacción aplicada al sistema y la deformación resultante del complejo músculo-tendinoso; este parámetro determina la eficiencia del almacenamiento y liberación de energía elástica durante el ciclo estiramiento-acortamiento y constituye un predictor tanto del rendimiento en tareas explosivas como del riesgo de lesión por sobrecarga. El segundo es la distribución de cargas articulares, que cuantifica cómo el sistema reparte las demandas mecánicas entre articulaciones adyacentes; su alteración es un denominador común en la osteoartritis, las lesiones deportivas por uso excesivo y la disfunción protésica.

El tercer parámetro universal es la eficiencia del ciclo estiramiento-acortamiento, que expresa la fracción de energía mecánica almacenada durante la fase excéntrica que es recuperada durante la fase concéntrica subsecuente; su variación entre poblaciones y condiciones informa sobre el estado funcional del tejido musculotendinoso y sobre la calidad del patrón motor. El cuarto es la simetría mecánica, definida operacional-

mente como el cociente entre variables cinemáticas o cinéticas homólogas de los hemicuerpos derecho e izquierdo; su desviación respecto a la unidad constituye un biomarcador de riesgo de lesión, de calidad del proceso de rehabilitación y de eficiencia del diseño protésico. El quinto parámetro es la economía de movimiento, expresada como el costo metabólico por unidad de desplazamiento o de trabajo mecánico externo realizado; integra los efectos de los cuatro parámetros anteriores al nivel del sistema y proporciona una métrica global de la eficiencia del sistema físico-biológico. Estos cinco parámetros no son independientes: forman una red de relaciones funcionales que el modelo integrador busca caracterizar en cada contexto de aplicación.

La identificación y cuantificación de estos parámetros requiere un marco metodológico que trascienda las herramientas de cualquiera de las disciplinas involucradas por separado. La propuesta integra cuatro estrategias complementarias (Figura 1). La primera es la revisión sistemática de la literatura biomecánica, que permite establecer los rangos normativos de cada parámetro en distintas poblaciones y contextos, identificar los determinantes de su variabilidad y fundamentar las hipótesis de trabajo del modelo. La segunda es la experimentación biomecánica en laboratorio, que combina plataformas de fuerza de alta frecuencia, sistemas de captura de movimiento en tres dimensiones con marcadores reflectivos o activos, electromiografía de superficie y análisis de marcha instrumentado para obtener las variables cinemáticas, cinéticas y electromiográficas necesarias para estimar los parámetros del sistema en condiciones controladas y reproducibles.

La tercera estrategia es la simulación musculoesquelética, implementada mediante plataformas como OpenSim o AnyBody, que permite estimar fuerzas musculares y articulares internas no accesibles experimentalmente mediante algoritmos de optimización estática o dinámica. Este nivel de análisis extiende el poder explicativo del modelo más allá de las variables observables, accediendo a la distribución de fuerzas entre músculos, a los momentos articulares netos y a los patrones de activación muscular predichos por el modelo. La cuarta estrategia es el modelado numérico multiescala, que articula representaciones del sistema en escalas que van desde la fibra muscular hasta el nivel

del segmento corporal y del organismo completo, pasando por el complejo músculo-tendinoso y la articulación. Este enfoque permite comprender cómo las propiedades mecánicas de los constituyentes del sistema determinan su comportamiento emergente a nivel del movimiento completo.

La fortaleza del enfoque integrador radica en su capacidad de aplicarse en distintos contextos del movimiento humano. En el deporte de alto rendimiento, el análisis de parámetros como la rigidez musculoesquelética y la economía de movimiento permite identificar las características mecánicas que diferencian los niveles de desempeño en disciplinas como la carrera, el ciclismo o la natación. Esto hace posible diseñar estrategias de entrenamiento orientadas a modificar parámetros físicos específicos del sistema, en lugar de enfocarse únicamente en variables generales de rendimiento. Por ejemplo, el incremento de la rigidez funcional del tendón de Aquiles mediante entrenamiento excéntrico progresivo puede mejorar la eficiencia del ciclo estiramiento-acortamiento y, con ello, optimizar la economía de carrera.

En rehabilitación, los parámetros biomecánicos universales ofrecen criterios más objetivos que los indicadores clínicos tradicionales, ya que variables como la simetría mecánica, las fuerzas de reacción al suelo y la economía de movimiento permiten evaluar de manera más integral el estado funcional del sistema. En prótesis, estos parámetros facilitan la evaluación objetiva de distintos diseños transtibiales o transfemorales y orientan la optimización de sus propiedades mecánicas para restaurar un patrón de movimiento más eficiente y simétrico.

La natación representa un caso de especial interés para este modelo debido a que el entorno acuático impone condiciones muy distintas a la locomoción terrestre, donde la hidrodinámica, la flotabilidad y la ausencia de fuerza de reacción al suelo modifican la interacción del cuerpo con el entorno. Aun así, los parámetros biomecánicos universales siguen siendo identificables y medibles. Variables como la rigidez musculotendinosa del complejo hombro-rotador, la simetría mecánica entre hemicuerpos y la economía de movimiento permiten evaluar la eficiencia técnica, el rendimiento y el riesgo de lesión en el nadador.

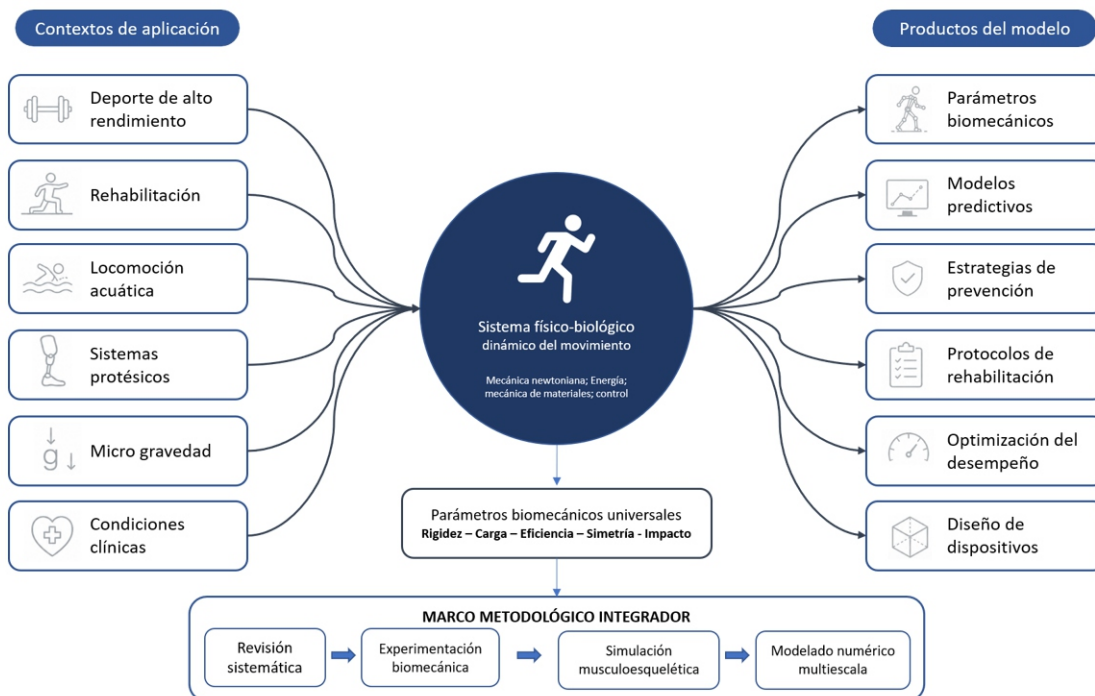


Figura 1. Marco conceptual del paradigma físico-biológico del movimiento humano.

El entorno de microgravedad representa quizás el caso límite más ilustrativo de la universalidad del enfoque. La eliminación de la carga gravitacional durante misiones espaciales de larga duración produce, en cuestión de semanas, alteraciones profundas en todos los parámetros universales del sistema: reducción de la rigidez musculoesquelética por atrofia del tejido y desmineralización ósea; alteración de la distribución de cargas articulares por el cambio en la alineación postural y en los patrones de activación muscular; deterioro de la economía de movimiento por la pérdida de masa muscular funcional; y asimetrías crecientes entre segmentos homólogos. La comprensión de estos efectos en términos físicos permite diseñar contramedidas de ejercicio basadas en principios mecánicos: no simplemente "hacer ejercicio", sino aplicar cargas específicas sobre los elementos del sistema que más degradación experimentan, con la intensidad y frecuencia que los modelos de adaptación mecánica predicen como óptimas.

El cambio de paradigma propuesto trasciende el ámbito técnico de la biomecánica al plantear la necesidad de desarrollar protocolos de evaluación sensibles a parámetros biomecánicos universales y, al mismo tiempo, suficientemente estandarizados para permitir comparaciones entre laboratorios, poblaciones y contextos. Este enfoque abre nuevas líneas de investigación orientadas a comprender cómo variables como la rigidez musculoesquelética, la distribución de cargas o la economía de movimiento cambian a lo largo de la vida, bajo distintas condiciones clínicas o en respuesta al entrenamiento. Desde una perspectiva más amplia, el cuerpo humano en movimiento puede entenderse como un sistema físico-biológico optimizable, en el que es posible identificar combinaciones de parámetros que maximicen la eficiencia, reduzcan el riesgo de lesión y mejoren el desempeño. En este sentido, surge la posibilidad de una biomecánica prospectiva: una disciplina capaz no solo de describir el movimiento humano, sino también de predecir y orientar su mejora mediante principios físicos y biomecánicos universales. El movimiento humano ha sido estudiado durante décadas con rigor y creatividad crecientes. La propuesta aquí presentada no niega el valor de ese acervo, sino que propone reorganizarlo bajo un marco conceptual de mayor alcance explicativo. Concebir el cuerpo en

movimiento como un sistema físico-biológico dinámico gobernado por principios universales no es una simplificación: es, paradójicamente, una forma de acceder a la complejidad del sistema con herramientas que han demostrado ser extraordinariamente poderosas en otros dominios de la ciencia. La física ya describe con precisión los puentes, los aviones, los fluidos y los materiales. El reto que se abre con este cambio de paradigma es demostrar que puede hacer lo mismo con el sistema más complejo, adaptable y fascinante que la naturaleza ha producido: el cuerpo humano en movimiento.

REFERENCIAS

1. Zajac FE. Muscle and tendon: properties, models, scaling, and application to biomechanics and motor control. *Crit Rev Biomed Eng.* 1989;17(4):359-411. PMID: 2676342.
2. Farley CT, González O. Leg stiffness and stride frequency in human running. *J Biomech.* 1996 Feb;29(2):181-6. doi: 10.1016/0021-9290(95)00029-1. PMID: 8849811.
3. Cavanagh PR, Kram R. Mechanical and muscular factors affecting the efficiency of human movement. *Med Sci Sports Exerc.* 1985 Jun;17(3):326-31. PMID: 3894869.
4. Delp SL, Anderson FC, Arnold AS, Loan P, Habib A, John CT, Guendelman E, Thelen DG. OpenSim: open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2007 Nov;54(11):1940-50. doi: 10.1109/TBME.2007.901024. PMID: 18018689.
5. Wilson A, Lichtwark G. The anatomical arrangement of muscle and tendon enhances limb versatility and locomotor performance. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2011 May 27;366(1570):1540-53. doi: 10.1098/rstb.2010.0361. PMID: 21502125; PMCID: PMC3130454.
6. Nigg BM, Herzog W. *Biomechanics of the Musculo-skeletal System.* 3rd ed. Wiley; 2007.
7. Fitts RH, Riley DR, Widrick JJ. Physiology of a microgravity environment invited review: microgravity and skeletal muscle. *J Appl Physiol (1985).* 2000 Aug;89(2):823-39. doi: 10.1152/jappl.2000.89.2.823. PMID: 10926670.
8. Ortiz-Lango LA, Miguel-Andrés I, López-López D, Mayagoitiza-Vázquez JJ, Becerro-de-Bengoa-Vallejo R, Losa-Iglesias M, Gómez-Salgado J, Saavedra-García MÁ. An overview of the risk factors for producing fifth metatarsal fracture in sports activities: A systematic review. *J Foot Ankle Res.* 2024 Dec;17(4):e70012. doi: 10.1002/jfa2.70012. PMID: 39425468; PMCID: PMC11489280.
9. Ramos-Frutos, J. A., Miguel-Andrés, I., León-Rodríguez, M., Ortiz-Lango, L. A., Orozco-Villaseñor, S. L., & Vidal-Lesso, A. (2023). Type of Feet in a Mexican Population: Analysis of the Footprint Morphology and Literature Review. *Revista Mexicana De Ingeniería Biomedica*, 44(2), 6–15. <https://doi.org/10.17488/RMIB.44.2.1>

FÍSICA Y MEDICINA: CASO ROBÓTICA E INTELIGENCIA ARTIFICIAL

DR. ALEJANDRO CASTAÑEDA MIRANDA

POSTGRADO EN INGENIERÍA AEROSPAZIAL, UNIVERSIDAD AERONÁUTICA DE QUERÉTARO
ACADEMIA DE INGENIERÍA MÉXICO



Actualmente, la convergencia entre la Física, Medicina, Robótica e Inteligencia Artificial representa uno de los avances tanto científicos, así como tecnológicos, de la bioingeniería aplicada a la salud, por ende, es de los avances más relevantes del siglo XXI **(1, 2, 3, 4)**. En este contexto, la robótica médica y la inteligencia artificial emergen como herramientas interdisciplinarias capaces de transformar los procesos clínicos **(5)**, quirúrgicos **(6)** y de rehabilitación **(7)**. Históricamente, la robótica aplicada a la medicina tiene sus primeros antecedentes en los sistemas automatizados utilizados en procedimientos quirúrgicos de alta precisión durante las décadas de 1980 y 1990 **(8)**. Desde entonces, los avances en mecánica, electrónica, control automático y física de materiales han permitido el diseño de robots quirúrgicos, prótesis inteligentes y dispositivos de asistencia médica con altos niveles de exactitud y seguridad **(9)**. Sistemas como los robots quirúrgicos asistidos por computadora han demostrado reducir el margen de error humano, minimizar procedimientos invasivos y mejorar los tiempos de recuperación de los pacientes **(9)**. Asimismo, el uso de sensores físicos avanzados, actuadores electromecánicos y técnicas de visión computacional ha fortalecido el desempeño de estos sistemas en entornos clínicos complejos **(10)**. Por otro lado, la inteligencia artificial ha revolucionado el análisis y procesamiento de grandes volúmenes de datos médicos mediante algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo **(11)**. Además, estas técnicas permiten identificar patrones en imágenes médicas, predecir enfermedades, optimizar diagnósticos y asistir en la toma de decisiones clínicas. De acuerdo a lo anterior, la integración de Inteligencia Artificial con robótica médica ha dado origen a sistemas autónomos y semiautónomos capaces de interactuar con el entorno hospitalario y

adaptarse a las necesidades específicas de cada paciente. Actualmente, el estado del arte en robótica e inteligencia artificial aplicada a la medicina se enfoca en cuatro grandes áreas: cirugía asistida por robots, rehabilitación inteligente, diagnóstico automatizado y medicina personalizada, como puede observarse en la Figura 1 (construcción propia, a partir de documentos de Ref. 9), se tienen ya desarrollados diferentes campos clasificados a partir de las siguientes aplicaciones:

- A) Imágenes médicas: Los algoritmos de Inteligencia Artificial analizan radiografías, resonancias magnéticas y tomografías computarizadas para facilitar la detección temprana de enfermedades, apoyar en la identificación de tumores y la planificación del tratamiento. Por otra parte, la robótica mejora las intervenciones guiadas por imágenes, permitiendo procedimientos más precisos (del orden de los micrómetros) y mínimamente invasivos.
- B) Apoyo a la toma de decisiones clínicas: Los sistemas basados en Inteligencia Artificial proporcionan sugerencias diagnósticas, regímenes de medicación personalizados y recomendaciones de tratamiento basadas en el historial del paciente, perfiles genéticos y evidencia médica con búsquedas científico-técnicas a gran escala.
- C) Cirugía robótica: La robótica quirúrgica mejora la precisión, minimiza la invasión en áreas no deseadas y proporciona información de la operación en tiempo real a los cirujanos, reduciendo así los tiempos de recuperación física del paciente y las minimizando las complicaciones.
- D) Gestión sanitaria: Las plataformas de Inteligencia Artificial y robótica optimizan la logística hospitalaria, monitorizan a los pacientes de forma

remota, controlan la adherencia a la medicación y utilizan análisis predictivos para anticipar las demandas clínicas y las necesidades de recursos.

Por otra parte, en cirugía robótica, los sistemas más avanzados incorporan control háptico, visión tridimensional y algoritmos de IA capaces de asistir al cirujano en tiempo real. Cabe recalcar que, estas plataformas utilizan modelos físicos y biomecánicos para aumentar la precisión de los movimientos quirúrgicos y reducir riesgos operatorios. Además, de que la incorporación de sensores de fuerza, técnicas de navegación por imágenes y simulaciones basadas en física computacional ha permitido desarrollar procedimientos menos invasivos y más seguros (10). En el ámbito de la rehabilitación, los exoesqueletos robóticos y prótesis inteligentes constituyen una de las líneas de investigación más activas. Adjuntado que, estos dispositivos emplean principios de dinámica, electromagnetismo y biomecánica para reproducir movimientos humanos y responder a señales musculares o neuronales. La inteligencia artificial permite adaptar el comportamiento del sistema al paciente mediante aprendizaje continuo, mejorando la recuperación motriz y la interacción humano-máquina (7). Se expone el caso de adaptación de vástagos femorales en un fémur cadavérico (5), hasta el uso adaptaciones de exoesqueletos (7), también se expuso la integración de la acupuntura con la robótica colaborativa equipada con sensores de fuerza y retroalimentación háptica, los cuales permiten controlar la profundidad, presión y ángulo de inserción

de las agujas. Por otra parte, se plantea la aplicación de campos eléctricos, para regular la intensidad y frecuencia de los impulsos eléctricos utilizados en terapias para dolor crónico, rehabilitación neurológica y trastornos musculares, lo cual representa una de las líneas emergentes de investigación dentro de la medicina tecnológica contemporánea. En este contexto, se expone también el uso de Campos Magnéticos Modulados para atender padecimientos neuronales, como lo es la implementación robotizada mediante neuronavegación de la Estimulación Magnética Transcraneal (12). Finalmente, la medicina personalizada constituye una de las tendencias más prometedoras. Mediante la combinación de Inteligencia Artificial, análisis de datos biomédicos y simulaciones físicas, es posible diseñar tratamientos adaptados a las características genéticas y fisiológicas de cada paciente. Esta integración favorece una atención médica más eficiente, preventiva y precisa (11). No obstante, a pesar de los importantes avances, aún existen desafíos relacionados con la ética, la seguridad de los datos, la validación clínica, los costos tecnológicos y la interacción entre humanos y sistemas autónomos (9). Cabe recalcar que, las investigaciones actuales indican que la integración de la Física, la Robótica y la Inteligencia Artificial continuará desempeñando un papel fundamental en la evolución de la medicina moderna, impulsando, sobre todo, soluciones innovadoras para el diagnóstico, tratamiento y rehabilitación, asistiendo en la salud, y considerando diversas enfermedades.

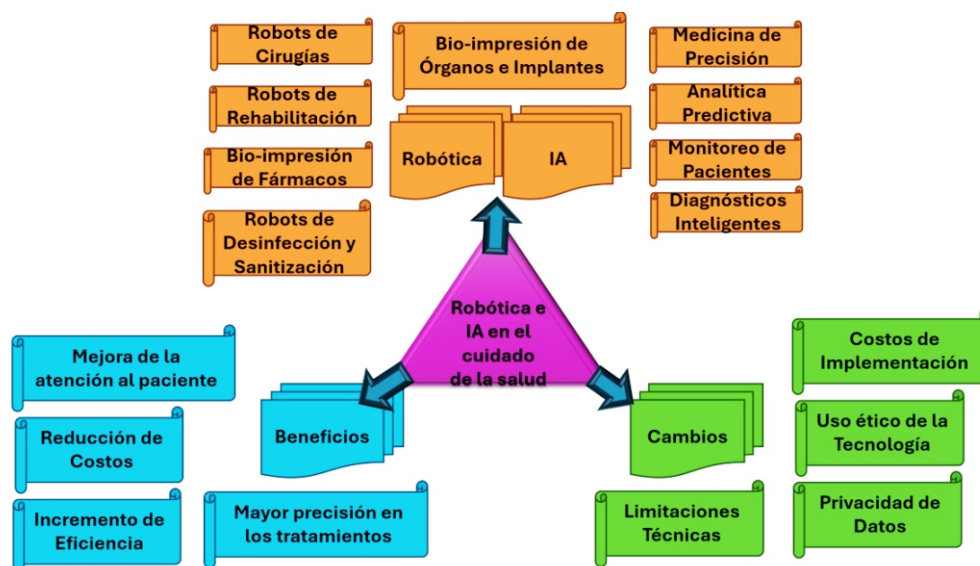


Figura 1.- Diagrama del impacto de la IA y la robótica en la atención médica (9)

En conclusión, la tecnología mejora la medicina, donde el futuro de la medicina implica un tratamiento más personalizado de pacientes (Menos errores, Mejores resultados, Recuperación rápida, Optimización del tiempo de Recuperación).

Referencias

- 1.- Tu, K., Ma, X., Qian, Z., & Duan, P. Large-scale multimodal model based embodied intelligent robots: A survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 163, 112991, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112991>, (2026).
- 2.- Aboti, I., Dhoble, N., Padole, N., Dhapake, P., & Baheti, J. (2026). Artificial Intelligence & Machine learning in Hydrogel: Revolutionizing Design and Optimization–Detailed Review. *Next Research*, 101335, <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2026.101335>, (2026).
- 3.- Lu, Y., Wu, K., Zan, Z., Chen, Q., Zhang, Y., & Li, W. A bidirectional transfer learning method for tool life prediction in machine tools and robots based on the spatio-temporal features of multi-modal sensors and physics-informed constraints. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 250, 114104, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2026.114104>, (2026).
- 4.- Zhihou, Y., Genliang, X., Dongfeng, M., Linpeng, Z., Shijie, L., & Hua, Z. A Review of Dual-arm Robot Manipulation Technology: Current Status, Challenges, and Future Development Directions. *Robotics and Autonomous Systems*, 105485, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2026.105485> Get rights and content, (2026).
- 5.- Ahsan, Z., Mahmud, S., Chowdhury, M. R., Ali, Y., Fuad, T. B., Islam, S., & Hossain, N. Advances in Additive Manufacturing for Medical Robotics: A Review. *Results in Surfaces and Interfaces*, 100735, <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2026.100735>, (2026).
- 6.- Tuygunov, N., Mattheos, N., Tsoi, J., Ruzikulova, M., Osathanon, T., & Samaranayake, L. Contemporary Applications of Robotic Systems in Dental Implantology: A Review. *International dental journal*, 76(1), 109335, <https://doi.org/10.1016/j.identj.2025.109335>, (2026).
- 7.- AL-Quraishi, M. S., Tahir, H., El-Ferik, S., & Ali, S. S. A. Global Trends in EEG-Based BCI for Exoskeletons, Prostheses, and Rehabilitation Robots: A Bibliometric and Topic Modeling Synthesis. *Results in Engineering*, 110833, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.110833>, (2026).
- 8.- Diao, B. Y., Wang, R., Liu, Z., & Zhan, H. X. Historical development of the da vinci robotic surgical system in pancreaticoduodenectomy. *Intelligent Surgery*, <https://doi.org/10.1016/j.isurg.2025.08.002>, (2025).
- 9.- Kumbhar, S., Gaikwad, V., Eram, A., Dhumal, S., Sayali, S., Bhusal, S., & Pangavhane, P. Revolutionizing Care: The Dynamic Duo of AI and Robotics in Healthcare. *Intelligent Hospital*, 100024, <https://doi.org/10.1016/j.inhs.2025.100024>, (2025).
- 10.- Wang, N., Ying, Y., Wang, W., Liu, J., Wu, D., & Zhao, Y. Intelligent sensing and measurement technologies for medical robotics: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 116956, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.116956>, (2025).
- 11.- Winkler, D. A. Synergies between data science methods and innovative drug delivery technologies. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 115783, <https://doi.org/10.1016/j.addr.2026.115783>, (2026).
- 12.- Mittelman, L., Kazmi, J. S., Syed, S., Vargas, L. O., Duehr, J., Jerliu, G., & D'Amico, R. S. Precision Functional Network Imaging-Guided Transcranial Magnetic Stimulation: A Review of Clinical Applications Through Resting-State fMRI. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 109435, <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2026.109435>, (2026).



NANOTECNOLOGÍA

DRA. NORA ELIZONDO VILLARREAL,

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS, U.A.N.L.,
NORA.ELIZONDOVL@UANL.EDU.MX



La Física y la Medicina han mantenido una relación estrecha a lo largo del desarrollo científico moderno. Los principios físicos han permitido comprender fenómenos biológicos y desarrollar tecnologías que actualmente forman parte esencial del diagnóstico y tratamiento médico. En este contexto, la nanotecnología ha surgido como una de las áreas más prometedoras de la física aplicada a la medicina, debido a su capacidad para manipular materiales a escala nanométrica y generar estructuras con propiedades físicas, químicas y biológicas únicas (Gangadhar et al., 2025). Parte del contenido desarrollado en este texto se basa en la presentación sobre física médica y nanotecnología.

La nanotecnología permite trabajar con materiales cuyas dimensiones se encuentran en el rango de los nanómetros, es decir, una millonésima parte de un milímetro. A esta escala, los materiales presentan propiedades diferentes a las observadas en tamaños macroscópicos, incluyendo cambios en propiedades ópticas, eléctricas, magnéticas y catalíticas. Estas propiedades han abierto nuevas posibilidades en el desarrollo de materiales avanzados para aplicaciones biomédicas, farmacéuticas y tecnológicas (Eker et al., 2024).

Uno de los aspectos más importantes de la nanotecnología en medicina es su aplicación en el diagnóstico médico. Las nanopartículas pueden utilizarse como agentes de contraste en técnicas de diagnóstico por imagen, permitiendo obtener imágenes de mayor resolución y sensibilidad diagnóstica de tejidos y órganos. Gracias a sus propiedades ópticas y magnéti-

cas, nanopartículas metálicas como las de oro, plata, cobre y óxidos de hierro pueden mejorar significativamente la sensibilidad de técnicas como la resonancia magnética, la tomografía y biosensores avanzados (Wang et al., 2024). Estas herramientas facilitan la detección temprana de enfermedades, incluyendo diversos tipos de cáncer e infecciones virales.

Además del diagnóstico, la nanotecnología ha revolucionado el área terapéutica mediante la administración dirigida de medicamentos. Las nanopartículas pueden ser diseñadas para transportar fármacos directamente hacia tejidos específicos, aumentando la eficacia del tratamiento y disminuyendo los efectos secundarios. Esto resulta especialmente importante en enfermedades como el cáncer, donde los tratamientos convencionales afectan tanto células enfermas como sanas. Las nanopartículas funcionalizadas pueden reconocer receptores específicos presentes en células tumorales y liberar el medicamento únicamente en la zona afectada (Mitchell et al., 2021).

Las nanopartículas (NPs) constituyen uno de los componentes más importantes de la nanomedicina debido a sus propiedades físicas, químicas y biológicas únicas. Su tamaño nanométrico les permite interactuar con células, proteínas y estructuras biológicas de manera altamente eficiente, facilitando aplicaciones en diagnóstico, terapia, liberación controlada de medicamentos y desarrollo de biomateriales avanzados (Saxena et al., 2025).

Entre las NPs más estudiadas destacan las de oro (Au), plata (Ag), cobre (Cu) y óxidos de hierro. Las nanopartí-

culas de oro poseen propiedades ópticas y plasmónicas que permiten su utilización en biosensores, sistemas de detección molecular y terapias fototérmicas contra células cancerosas. Además, presentan elevada biocompatibilidad y facilidad de funcionalización química, lo que favorece su uso en sistemas de administración dirigida de fármacos (Karnwal et al., 2024).

Las nanopartículas de plata son ampliamente reconocidas por su actividad antimicrobiana y antiviral. Diversos estudios han demostrado que estas NPs pueden inhibir el crecimiento de bacterias, hongos y algunos virus mediante mecanismos relacionados con la alteración de membranas celulares, generación de especies reactivas de oxígeno y daño al ADN microbiano (Almatroudi et al., 2020; Jangid et al., 2024). Debido a ello, se utilizan en recubrimientos hospitalarios, textiles médicos, dispositivos biomédicos y materiales de curación.

Las nanopartículas de cobre han despertado gran interés debido a sus propiedades catalíticas, eléctricas y antibacterianas. Estas NPs pueden participar en procesos fotocatalíticos para degradación de contaminantes orgánicos y presentan potencial para aplicaciones biomédicas y ambientales. Investigaciones recientes han demostrado que las nanopartículas de cobre poseen actividad antibacteriana frente a microorganismos como *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*, debido a su capacidad para alterar membranas celulares bacterianas y generar estrés oxidativo (Crisan et al., 2022). Estas propiedades permiten considerar a las CuNPs como materiales prometedores para recubrimientos antimicrobianos, dispositivos biomédicos y aplicaciones hospitalarias.

Asimismo, nanopartículas magnéticas de óxidos de hierro son utilizadas en resonancia magnética, hipertermia magnética y sistemas de liberación controlada de medicamentos (Ghazi et al., 2025). Las aplicaciones terapéuticas de las NPs incluyen la administración dirigida de fármacos, donde los nanomateriales funcionan como vehículos capaces de transportar compuestos farmacológicos directamente hacia tejidos específicos. Esto permite aumentar la concentración del medicamento en el sitio de interés y

reducir efectos secundarios sistémicos. En cáncer, por ejemplo, las NPs pueden acumularse selectivamente en tumores debido al efecto de permeabilidad y retención aumentada, mejorando significativamente la eficacia terapéutica (Mitchell et al., 2021).

Las NPs también tienen aplicaciones importantes en medicina regenerativa e ingeniería de tejidos. Materiales nanoestructurados como la hidroxiapatita favorecen la regeneración ósea y la integración de implantes dentales y ortopédicos. Además, la incorporación de NPs en biomateriales permite mejorar propiedades mecánicas, antibacterianas y biológicas de los implantes utilizados en medicina moderna (Mullick et al., 2025).

En años recientes, la síntesis ecológica o “síntesis verde” de NPs ha adquirido gran relevancia científica debido a la necesidad de desarrollar procesos sustentables y amigables con el medio ambiente. Estos métodos utilizan extractos vegetales, microorganismos y compuestos naturales como agentes reductores y estabilizantes, disminuyendo el uso de sustancias tóxicas y reduciendo el impacto ambiental asociado con la síntesis convencional (Saxena et al., 2025).

Como se observa en la Figura 1, las nanopartículas poseen propiedades ópticas, magnéticas, eléctricas y catalíticas que permiten múltiples aplicaciones en el área de la física médica y la nanomedicina. Entre las aplicaciones más importantes destacan el diagnóstico temprano de enfermedades mediante agentes de contraste y biosensores, la liberación dirigida de medicamentos, las terapias avanzadas contra el cáncer y enfermedades infecciosas, así como el desarrollo de biomateriales e implantes biocompatibles. Asimismo, las NPs de oro, plata, cobre y óxidos de hierro favorecen el desarrollo de tratamientos más precisos, seguros y eficientes. La figura también destaca la importancia de la síntesis verde de nanopartículas y las perspectivas futuras orientadas hacia una medicina personalizada y terapias menos invasivas (Fahim et al., 2024; Eker et al., 2024; Bhatia, 2022; Mitchell et al., 2021).

Figura 1. Aplicaciones de la física médica y la nanotecnología en salud. Las nanopartículas (NPs) presentan

propiedades ópticas, magnéticas, eléctricas y catalíticas que permiten su utilización en diagnóstico médico, liberación dirigida de medicamentos, biosensores, terapias avanzadas, biomateriales e ingeniería de tejidos. Asimismo, las NPs de oro, plata, cobre y óxidos

de hierro muestran aplicaciones antimicrobianas, antivirales y fototérmicas, contribuyendo al desarrollo de tratamientos más precisos, seguros y eficientes en nanomedicina (Fahim et al., 2024; Eker et al., 2024; Bhatia, 2022; Mitchell et al., 2021).



Figura 1

La investigación en nanomedicina también ha permitido el desarrollo de biosensores plasmónicos y cristales fotónicos capaces de detectar biomoléculas y virus en concentraciones extremadamente bajas. Estos dispositivos aprovechan fenómenos físicos relacionados con la interacción entre la luz y nanomateriales metálicos. Gracias a ello, se pueden desarrollar sistemas de detección rápida para aplicaciones clínicas y ambientales. Los biosensores representan una de las áreas con mayor potencial en medicina personalizada y monitoreo temprano de enfermedades (Anselmo & Mitragotri, 2021; Park & Jackman, 2025).

Por otra parte, la nanotecnología se encuentra presente en numerosos fenómenos naturales. Diversos

organismos vivos poseen nanoestructuras responsables de propiedades ópticas y mecánicas sorprendentes. Ejemplos de ello incluyen las alas de ciertas mariposas, las plumas del pavorreal y las patas del gecko. Estas estructuras inspiran el desarrollo de materiales inteligentes y superficies funcionales utilizadas en medicina, óptica y electrónica avanzada.

Además, el desarrollo de la nanotecnología ha permitido impulsar investigaciones relacionadas con medicina personalizada, donde los tratamientos pueden diseñarse específicamente para las características biológicas de cada paciente. Las nanopartículas inteligentes tienen la capacidad de responder a estímulos externos como temperatura, luz, pH o campos magnéticos,

permitiendo controlar la liberación de medicamentos de manera más eficiente y localizada. Estas estrategias buscan disminuir la toxicidad de tratamientos convencionales y aumentar la efectividad terapéutica en enfermedades complejas como cáncer, infecciones resistentes y padecimientos neurodegenerativos. Asimismo, la combinación de nanotecnología con inteligencia artificial, biosensores y sistemas de diagnóstico molecular representa una de las áreas de mayor crecimiento científico y tecnológico en la actualidad. La colaboración interdisciplinaria entre física, química, biología, medicina e ingeniería continuará siendo fundamental para el desarrollo de nuevas aplicaciones biomédicas y tecnologías enfocadas en mejorar la calidad de vida de la población.

La nanotecnología también ha comenzado a integrarse en dispositivos portátiles y sistemas inteligentes de monitoreo médico capaces de detectar cambios fisiológicos en tiempo real. Sensores nanoestructurados pueden identificar biomarcadores asociados con enfermedades cardiovasculares, diabetes o infecciones mediante pequeñas muestras biológicas, permitiendo diagnósticos más rápidos y precisos. Asimismo, el desarrollo de nanorobots y sistemas nanoelectrónicos abre nuevas posibilidades para realizar procedimientos mínimamente invasivos dentro del cuerpo humano. Estas innovaciones representan una de las áreas más futuristas de la física médica y podrían transformar profundamente la medicina preventiva y personalizada en las próximas décadas (Anselmo & Mitragotri, 2021; Xu et al., 2023).

A pesar de sus múltiples beneficios, también es importante considerar los posibles efectos tóxicos de los nanomateriales. La nanotoxicología estudia las interacciones entre nanopartículas y sistemas biológicos, incluyendo posibles daños celulares, inflamación o acumulación en órganos. Por ello, es fundamental realizar estudios rigurosos de biocompatibilidad antes de implementar aplicaciones clínicas a gran escala. La investigación actual busca desarrollar NPs cada vez más seguras, biodegradables y específicas (Thomas et al., 2025).

La nanomedicina representa actualmente una de las áreas más innovadoras de la ciencia moderna. Su

integración con la física médica ha permitido desarrollar tecnologías que transforman la manera en que se diagnostican y tratan enfermedades. Los avances en administración dirigida de medicamentos, terapias contra el cáncer, medicina regenerativa y biosensores demuestran el enorme potencial de esta disciplina interdisciplinaria.

Otro aspecto relevante de la nanomedicina es su aplicación en terapias fototérmicas y fotodinámicas utilizadas en el tratamiento del cáncer. Estas terapias aprovechan las propiedades ópticas de ciertas nanopartículas para absorber energía luminosa y transformarla en calor o especies reactivas capaces de destruir células tumorales de manera selectiva. Este tipo de tratamientos representa una alternativa menos invasiva en comparación con métodos tradicionales como quimioterapia o radioterapia. Asimismo, diversas investigaciones evalúan el uso de nanopartículas en vacunas, sistemas antivirales y monitoreo en tiempo real de procesos biológicos. El avance de estas tecnologías demuestra que la nanotecnología no solo contribuye al tratamiento de enfermedades, sino también a la prevención y detección temprana, fortaleciendo el desarrollo de una medicina moderna más eficiente y personalizada (Bhatia, 2022; Anselmo & Mitragotri, 2021).

Finalmente, la nanotecnología constituye una herramienta transformadora capaz de impulsar una medicina más precisa, personalizada y eficiente. El desarrollo de métodos ecológicos para la síntesis de nanopartículas y la colaboración entre distintas áreas científicas permitirán continuar avanzando hacia tratamientos más seguros y sostenibles. La física médica y la nanotecnología representan no solo el futuro de la medicina, sino una realidad científica en constante evolución que ya está impactando significativamente la calidad de vida de las personas.

Referencias

- 1.- Almatroudi, A. (2020). Silver nanoparticles: Synthesis, characterisation and biomedical applications. *Open Life Sciences*, 15(1), 819–839. <https://doi.org/10.1515/biol-2020-0094>
- 2.- Anselmo, A. C., & Mitragotri, S. (2021). Nanoparticles in the clinic: An update. *Bioengineering & Translational Medicine*,

- 6(2), e10246. <https://doi.org/10.1002/btm2.10246>
- 3.- Bhatia, S. N. (2022). Cancer nanomedicine. *Nature Reviews Cancer*, 22(10), 550–556. <https://doi.org/10.1038/s41568-022-00496-9>
 - 4.- Crisan, M. C., Teodora, M., & Lucian, M. (2022). Copper nanoparticles: Synthesis and characterization, physiology, toxicity and antimicrobial applications. *Applied Sciences*, 12(1), 141. <https://doi.org/10.3390/app12010141>
 - 5.- Eker, F., Duman, H., Akdaşçi, E., Bolat, E., Sarıtaş, S., Karav, S., & Witkowska, A. M. (2024). A comprehensive review of nanoparticles: From classification to application and toxicity. *Molecules*, 29(15), 3482. <https://doi.org/10.3390/molecules29153482>
 - 6.- Fahim, M., Shahzaib, A., Nishat, N., Jahan, A., Bhat, T. A., & Inam, A. (2024). Green synthesis of silver nanoparticles: A comprehensive review of methods, influencing factors, and applications. *J C I S O p e n*, 16, 100125. <https://doi.org/10.1016/j.jciso.2024.100125>
 - 7.- Gangadhar, L., & Subburaj, S. (2025). Nanotechnology advances for biomedical applications. *Frontiers in Nanotechnology*, 7, 1639506. <https://doi.org/10.3389/fnano.2025.1639506>
 - 8.- Ghazi, R., Ibrahim, T. K., Abdul Nasir, J., Gai, S., Ali, G., Boukhris, I., & Rehman, Z. (2025). Iron oxide based magnetic nanoparticles for hyperthermia, MRI and drug delivery applications: A review. *RSC Advances*, 15, 11587–11616. <https://doi.org/10.1039/D5RA00728C>
 - 9.- Jangid, H., Singh, S., Kashyap, P., Singh, A., & Kumar, G. (2024). Advancing biomedical applications: An in-depth analysis of silver nanoparticles in antimicrobial, anticancer, and wound healing roles. *Frontiers in Pharmacology*, 15, 1438227. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1438227>
 - 10.- Karnwal, A., Sachan, R. S. K., Devgon, I., Devgon, J., Pant, G., Panchpuri, M., Ahmad, A., Alshammari, M. B., Hossain, K., & Kumar, G. (2024). Gold nanoparticles in nanobiotechnology: From synthesis to biosensing applications. *ACS Omega*, 9(29), 29966–29982. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c10352>
 - 11.- Mitchell, M. J., Billingsley, M. M., Haley, R. M., Wechsler, M. E., Peppas, N. A., & Langer, R. (2021). Engineering precision nanoparticles for drug delivery. *Nature Reviews Drug Discovery*, 20(2), 101–124. <https://doi.org/10.1038/s41573-020-0090-8>
 - 12.- Mullick, P., & Manna, A. (2025). Nano-biomaterials: Emerging tools in biomedical innovation and therapy. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 36, 100627. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2025.100627>
 - 13.- Park, H. R., & Jackman, J. A. (2025). Emerging virus applications for nanoplasmonic biosensors. *npj Biosensing*, 2, 22. <https://doi.org/10.1038/s44328-025-00043-0>
 - 14.- Saxena, R., & Sharma, S. (2025). A review on green synthesis of nanoparticles toward sustainable applications. *Results in Engineering*, 25, 103456. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103456>
 - 15.- Thomas, J., Kumar, V., Sharma, N., Johnd, N., Meshram, A., Dasarathally, L. K., Ramesh, D., & Strezhak, D. (2025). Nanotoxicity assessment for drug delivery applications: Challenges and prospects. *Medicine in Drug Discovery*, 25, 100205. <https://doi.org/10.1016/j.medidd.2025.100205>
 - 16.- Wang, B., Hu, S., Teng, Y., Chen, J., Wang, H., Xu, Y., Wang, K., Xu, J., Cheng, Y., & Gao, X. (2024). Current advance of nanotechnology in diagnosis and treatment for malignant tumors. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 9, 200. <https://doi.org/10.1038/s41392-024-01889-y>
 - 17.- Xu, M., Han, X., Xiong, H., Gao, Y., Xu, B., Zhu, G., & Li, J. (2023). Cancer nanomedicine: Emerging strategies and therapeutic potentials. *Molecules*, 28(13), 5145. <https://doi.org/10.3390/molecules28135145>



NANOMEDICINA ODONTOLÓGICA

DRA. LAURA SUSANA ACOSTA TORRES

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES LEÓN,
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



1. Introducción y justificación clínica

En el ámbito de la odontología protésica, los biomateriales tradicionales, predominantemente el poli(metacrilato de metilo) (PMMA), han demostrado un desempeño biomecánico satisfactorio a escala macroscópica como soporte estructural. No obstante, estos materiales presentan una vulnerabilidad crítica ante la colonización patogénica en la microescala. Las superficies inertes de las prótesis actúan como sustratos ideales para la adhesión y proliferación de biopelículas infecciosas oportunistas, destacando especies como *Candida albicans* y *Escherichia coli*.¹ Ante este imperativo clínico, la investigación traslacional actual se enfoca en la transición de materiales pasivos a sustratos bioactivos con propiedades antimicrobianas inherentes mediante la integración de nanotecnología.

2. Rutas de síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs)

La síntesis de nanomateriales de plata se ha abordado desde dos vertientes metodológicas principales: la química clásica y la fitoquímica o "síntesis verde".

- **Síntesis Química Clásica:** Utiliza nitrato de plata como precursor, borohidruro de sodio como agente reductor y citrato trisódico como estabilizante en medio acuoso. Esta ruta permite un control morfológico preciso; por ejemplo, la transformación de nanoesferas en nanoprismas triangulares se logra mediante la aplicación de energía específica (70 W durante 24 h).²
- **Síntesis Verde (Ecoeficiente):** Emplea extractos naturales de plantas como agentes reductores,

eliminando la necesidad de químicos agresivos y mejorando la biocompatibilidad. Se han validado extractos de **Geranio (*Pelargonium x hortorum*)**³ y **Ajenjo (*Artemisia absinthium*)**.⁴ En el caso del geranio, el proceso de reducción ocurre en aproximadamente 30 minutos, utilizando una infusión de la planta mezclada con y polietilenglicol.³

• 3. El papel crítico de la física en el avance de la salud y el rol de la nanomedicina odontológica

La validación estructural es fundamental para la seguridad clínica. Esta precisión física es lo que permite que la medicina a nanoescala sea viable, asegurando que los nuevos biomateriales cumplan con su propósito de soporte estructural sin comprometer la salud celular.

Se emplean diversas técnicas de vanguardia para garantizar el control de calidad, como se muestra en la tabla 1.

4. Evaluación biológica y mecanismos de acción

El efecto antimicrobiano de las AgNPs integradas en resinas acrílicas ha sido validado contra diversos patógenos. El mecanismo de acción sistémico celular incluye la alteración de la permeabilidad de la membrana plasmática, la generación letal de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS) en el citoplasma, daño directo al ADN nuclear y la interrupción de la cadena de respiración mitocondrial.³

Las pruebas de adherencia microbiana revelan que la matriz de PMMA dopada con AgNPs de síntesis verde (Geranio) exhibe la reducción patogénica más significa-

Técnica o concepto físico	Uso en la investigación	Aplicación traslacional (clínica)
Microscopía Electrónica (TEM / SEM)	Análisis de la topografía, morfología (esferas vs. prismas) y distribución espacial de las nanopartículas.	Garantía de la bioseguridad humana mediante el control estricto de las dimensiones del nanomaterial (ej. partículas de nm).
Espectroscopía UV-Vis	Estudio de la interacción con la luz mediante la Resonancia de plasmones superficiales .	Confirmación de la reducción exitosa de precursores químicos o naturales a nanopartículas de plata (AgNPs).
Espectroscopía Raman / XRD	Identificación de la huella cristalográfica molecular y el modo en que vibran las estructuras.	Verificación de la pureza y composición de materiales para cementos selladores de conductos y suturas.
Cromatografía y Espectrometría de Masas (GC-MS)	Elucidación estructural de agentes reductores y trazabilidad fitoquímica de extractos naturales.	Estandarización de la síntesis verde para crear biocoronas estabilizadoras con nula toxicidad cruzada en el paciente.
Modulación de Energía (70 W)	Aplicación de energía física controlada para transformar la geometría de las nanopartículas (de esferas a nanoprismas).	Optimización de la reactividad de los materiales para aplicaciones específicas como materiales dentales de impresión .
Biofísica Celular (Mecanismo de acción)	Análisis de cambios en la permeabilidad de membrana , flujo de iones y producción de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS).	Desarrollo de apósitos y curaciones postquirúrgicas con mecanismos letales dirigidos contra patógenos como <i>C. albicans</i> .

Tabla 1. Usos y aplicaciones de la física en nanomedicina odontológica.

tiva frente a *Candida albicans*, superando estadísticamente a los materiales comerciales y a los dopajes químicos tradicionales.³ En cuanto a la citocompatibilidad, los ensayos MTT realizados en fibroblastos 3T3-NIH y linfocitos T humanos (células Jurkat) demuestran que las resinas nanoestructuradas mantienen niveles de viabilidad celular superiores al 90 %, lo que garantiza su bioseguridad para uso humano.¹

5. Reflexión final

La física es una herramienta de uso prioritario para el diagnóstico, es la base de la bioingeniería que permite conocer e identificar materiales biocompatibles que interactúan de forma segura y efectiva con el organismo.

Referencias Bibliográficas

- Acosta-Torres, L. S. (2012). Cytocompatible antifungal acrylic resin containing silver nanoparticles for dentures. *International Journal of Nanomedicine*, 7, 4777-4786.
- López, I. A., Ceballos, M., Hernández, G., Acosta, L., & Gómez, I. (2015). Shape transformation from silver triangular nanoprisms to nanodisks: Raman characterization and sculpturing mechanism. *Revista Mexicana de Física*, 61(1), 77-82.
- López-Ayuso, C. A., García-Contreras, R., Manisekaran, R., Figueroa, M., Arenas-Arrocena, M. C., Hernandez-Padrón, G., et al. (2023). Evaluation of the biological responses of silver nanoparticles synthesized using *Pelargonium x hortorum* extract. *RSC Advances*, 13, 29784-29796.
- Rodríguez-Torres, M. P., et al. (2019). Artemisia absinthium-based silver nanoparticles antifungal evaluation against three *Candida* species. *Materials Research Express*, 6(8), 085408.



ÉTICA Y BIOÉTICA DE LA FÍSICA Y DE LA MEDICINA: ENCUENTROS Y DESENCUENTROS

DRA. JUAN GARZA RAMOS

FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA-UNAM.
PRESIDENTE DEL DEPARTAMENTO DE SALUD PÚBLICA Y SOCIOLOGÍA MÉDICA
ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA DE MÉXICO



Introducción

Agradezco la invitación de la Academia Nacional de Medicina y la propuesta del Dr. Víctor Castaño de establecer una presentación tipo provocación. Me permiten replantear el título de *Física y Medicina* por el de *Física Y Salud*, la razón de este cambio es sencilla, tradicionalmente la medicina se ha centrado en los enfermos, aquí la primera provocación, “el mejor médico no es el que cura enfermos sino el que mantiene sano a los sanos”.

El verdadero reto requiere un ecosistema estable y para eso buscamos la salud, si nos adelantamos más hablamos de salud pública y ahora de “Una Sola Salud” por qué buscamos la salud de los humanos, de los ecosistemas, de las plantas, de los animales, y finalmente, la intención es encontrar la salud global.

Salud global y objetivos de desarrollo sostenible

Naciones Unidas, preocupada porque muchas de las actividades de nuestra población creciente han deteriorado el ambiente, impulsó la metodología de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con un enfoque transdisciplinario, intersectorial, meta institucional y de alta complejidad.

Esto ha propiciado que los organismos internacionales de Naciones Unidas y otros independientes ya no trabajen de forma aislada, sino que busquen cooperar entre sí. El objetivo es mejorar la alimentación para tener una mejor salud, pero también evitar las enfermedades, ya que enfrentamos una gran cantidad de

enfermedades emergentes y reemergentes que ocurren porque estamos deteriorando el equilibrio ambiental. Además, no solamente se trata de dejar de trabajar de manera aislada, sino de hacerlo en equipos; y, por otro lado, también queremos dejar de seguir trabajando en forma segmentada, establecer una reorganización y avanzar hacia un trabajo articulado. Esto fue algo que intentamos hacer o proponer durante la epidemia del COVID-19, pero lamentablemente muchos continuaron trabajando bajo la inercia.

¿Cuál es el mayor reto para la producción de alimentos y para mantener la salud de las poblaciones? el cambio climático.

El cambio climático ha ocasionado un calentamiento, se superan los 30 grados, lo que propicia cambios en la polinización, la fotosíntesis, en la reducción de la producción y estamos viendo que los océanos están cada vez más cálidos, esta calidez se asocia con el desarrollo de enfermedades, ahora hablamos de Cambio Climático, en algunos casos ya se habla de Crisis Climática. Si seguimos haciendo estas presentaciones sin lograr cambios en nuestra forma de manejar a los ecosistemas hablaremos de Catástrofe Climática, después llegaremos a un Colapso Climático y al final ya no va a haber quién nos diga que es lo que está pasando. La realidad es que las emisiones de CO2 están creciendo de manera notable pero fundamentalmente por la quema de combustibles fósiles. El conflicto actual en Medio Oriente es por la posesión y mercado de los combustibles fósiles, lo que pasa con estos combustibles es que estamos calentando cada vez más nuestro planeta y estamos provocando daños muy graves. Se ha

asociado por ejemplo que la temperatura del Océano Índico es un índice muy claro de brotes de dengue, pero también porque hay brotes de mosquitos transmisores, vectores de este dengue. En 2023, se registró la temperatura más elevada, y a consecuencia de estos hallazgos, ahora se habla del día mundial del mosquito, pero en realidad el mosquito no es más que una consecuencia de la alta temperatura.

El origen de las altas temperaturas se encuentra en el Golfo. Ello se debe a que las Corrientes Oceánicas que emergen proporcionan una temperatura óptima al continente europeo y posteriormente retornan, configurando un sistema de circulación conocido como termohalina. La función principal de esta circulación es la distribución global del calor, el transporte de agua, nutrientes y carbono, así como la conexión con la red mundial de corrientes oceánicas. Estas corrientes presentan múltiples puntos de riesgo que pueden derivar en conflictos asociados a variaciones en la temperatura terrestre.

Sobre estas corrientes nadie se preocupaba, el tema había recibido escasa atención; sin embargo, en 2025 se registró un incremento notable de artículos explicativos en medios como *The New York Times*, *Fox*, *WIRED*, entre otros. Paralelamente, algunos medios escépticos subrayan la incertidumbre científica y sostienen que no deben adoptarse medidas mientras no existan comprobaciones concluyentes, mientras que otros tienden a exagerar o minimizar la situación, generando confusión pública. En este contexto de incertidumbre, se observa cómo ciertos discursos mediáticos nos venden que la guerra de Medio Oriente es la solución a la problemática de nuestra sociedad.

Durante 2024 y 2025 se produjo un aumento significativo de estudios científicos y declaraciones públicas tanto de políticos como de instituciones académicas y parlamentarias, reflejando una profunda preocupación por el riesgo que implicaría un colapso de la corriente del golfo. Islandia, por ejemplo, ha señalado que este fenómeno constituye un asunto de seguridad nacional, lo que evidencia la magnitud del desafío y la necesidad de abordarlo desde una perspectiva integral que combine ciencia, política y sociedad.

Tecnologías emergentes y su impacto en el mundo

Se han identificado 10 tecnologías emergentes para este 2026

- 1.- El combustible de aviación sostenible
- 2.- Sensores microscópicos para plantas
- 3.- Computación Sostenible
- 4.- IA generativa
- 5.- IA en la salud y la sanidad
- 6.- Metaverso para la salud mental
- 7.- Virus de diseño
- 8.- Mapas Ómicos
- 9.- Baterías Flexibles
- 10.- Electrónica Neuronal Flexible

En esta sesión varios participantes han expuesto diversas aplicaciones relacionadas con el tema

Límites planetarios y energías limpias

La tierra enfrenta un escenario crítico: seis de los nueve límites planetarios ya han sido sobrepasados, amenazando la homeostasis global. La transición hacia energías limpias es urgente, la energía solar en lugar de la energía por los hidrocarburos, va a proporcionar energía a todo el mundo mucho más rápido de lo que nos imaginamos. Dinamarca ha puesto el ejemplo demostrado que las energías renovables crecen mientras las contaminantes disminuyen de manera drástica (introducir figura). China, por su parte, ha probado un motor de agua que podría sustituir el uso de hidrocarburos. Pudiera haber un motor manejado por agua espero que se logre, que se difunda rápidamente y que podamos sustituir la contaminación por hidrocarburos por un sistema que deje de lado el actual consumo de combustibles derivados del petróleo y calentamiento global.

Estos avances requieren ejecución transdisciplinaria, interinstitucional y multisectorial, se requiere de un intercambio de información muy amplio, esta sesión busca trabajar en equipos que colaboren en lugar de competir

Gobernanza y bioética

Tenemos que identificar qué debe hacer cada una de las instituciones, los organismos, las disciplinas para que dejemos de competir y empecemos a colaborar, a complementarnos para alcanzar un mayor bienestar y para ello tenemos que cambiar la legislación. Y el enfoque que tenemos que buscar formar equipos de trabajo que nos permitan definir las responsabilidades, las competencias, la intersectorialidad, la concurrencia, la corresponsabilidad, alcanzar sinergia y cómo trabajar eficientemente con equipos y redes, salirnos de nuestra zona de confort, no tener miedo de trabajar en la zona llamada de riesgo, aprender en la zona correspondiente y lograr el crecimiento que buena falta le hace a nuestro planeta y a nosotros, tenemos que crear un marco programático y legislativo y esa regulación tiene que abarcar sectores diversos que frecuentemente compiten por que unos buscan dinero y otros buscan insumos básicos como la alimentación o los medicamentos o la protección de los ecosistemas. Entonces los objetivos de Rio 20 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible ya realmente se están quedando atrás y ahora tenemos que buscar otros objetivos y para eso tenemos a las ciencias de la complejidad de las que se ha demostrado que para lograr avances de la naturaleza de lo que estamos proponiendo necesitamos que muchos organismos aprendan a trabajar en forma conjunta. Son sistemas complejos, trascienden al Sector de Salud Pública, al Sector Agropecuario, tienen que participar en ellos diversos ministerios, el Gobierno Federal, los Gobiernos Estatales, los Gobiernos Municipales, pero también el sector privado, el sector social, los industriales, los productores, los comerciantes, los profesionales y las academias. El camino a seguir debe surgir de las discusiones académicas como la que estamos desarrollando y para mejorar la salud tenemos que ir mucho más allá de los miembros del sector salud, incorporar a los del sector agropecuario y ambiental y poner a trabajar como el día de hoy nos han demostrado nuestros amigos físicos e ingenieros, la economía, el derecho, la sociología, la antropología, la ingeniería, el urbanismo junto con la física requieren de un trabajo armónico conjunto donde todos aprendamos a trabajar de manera apropiada. No tenemos las estructuras a

nivel institucional decía Peter Drucker que si tenemos una estructura equivocada vamos a tener fracasos y lo que tenemos ahora son estructuras equivocadas, hay mucho que hacer y para ello como bien decía el Dr. Castaño podemos utilizar a los principios bioéticos para buscar una armonía que no estamos logrando y trabajar una dimensión bioética desde todos los costados y esta forma de trabajo multidimensional también se tiene que hacer con el resto de los componentes de nuestra sociedad desde el punto de vista médico, ambiental, social, legal, económico, de gobernanza y dejar de ver a las instituciones como un organigrama plano sino como una especie de cubo o esfera en donde todos tenemos que aprender a colaborar con todos los demás, hay muchos trabajos en donde se ha buscado armonizar sistemas agroecológicos y sociales, hay que impulsar el bienestar humano cuidando el equilibrio de los ecosistemas, alcanzar una vida productiva a pesar del calentamiento del planeta y que cambiemos nuestras tecnologías para evitar dicho calentamiento. Esta reestructuración para lograr una mejor gobernanza requiere de un trabajo concurrente y no en competencia y tenemos que dejar de decir y hacer declaraciones y convertirlas en acciones e identificar en que nos vamos a comprometer cada uno de nosotros. Los temas complejos como este requieren de un trabajo transdisciplinario intersectorial, interinstitucional, intergeneracional, integral, como ya hemos escuchado esta tarde y con todos los sectores de la sociedad trabajando en conjunto y buscando que todo este trabajo se dirija a trabajar y a aprovechar mejor los determinantes sociales de la salud y el ambiente. Trabajamos sobre este tema en agosto de 2025, hicimos una reunión en esta misma academia donde participaron, entre otros, el Dr. José Sarhukán y la Dra. Julia Carabias y de los temas de cambio climático surgieron recomendaciones sobre la biodiversidad, sobre los alimentos, sobre las enfermedades, sobre la energía, sobre las políticas públicas y no crean que en una sola reunión, ni en esta ni en aquella o en las que vengan después, vamos a encontrar la solución, tenemos que seguir discutiendo estos temas y los invito a que el próximo 12 de agosto en este recinto de la Academia Nacional de Medicina nos acompañen para un simposio donde vamos a presentar los temas de salud pública y ahí analizar las causas de las

causas de las causas. Si un niño se enferma y tiene una infección no nada más darle el antibiótico y quedarnos ahí, tenemos que ver si lo que lo enfermó fue agua contaminada pues tenemos que darle agua potable, y si no tiene agua potable tenemos que ir al siguiente

escalón por eso es que tenemos que aprender a trabajar analizando y atendiendo las causas de las causas de las causas así es que los invitamos a estar aquí el día 12 de agosto y que sigamos creando redes y trabajando en equipo.

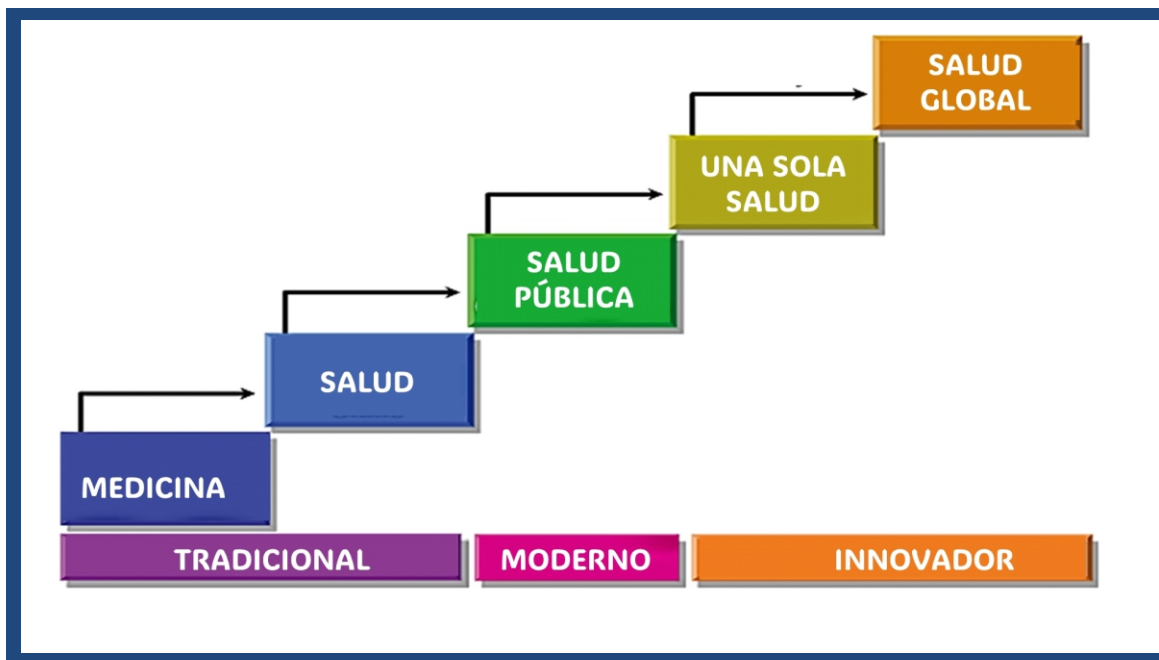


Figura 1.

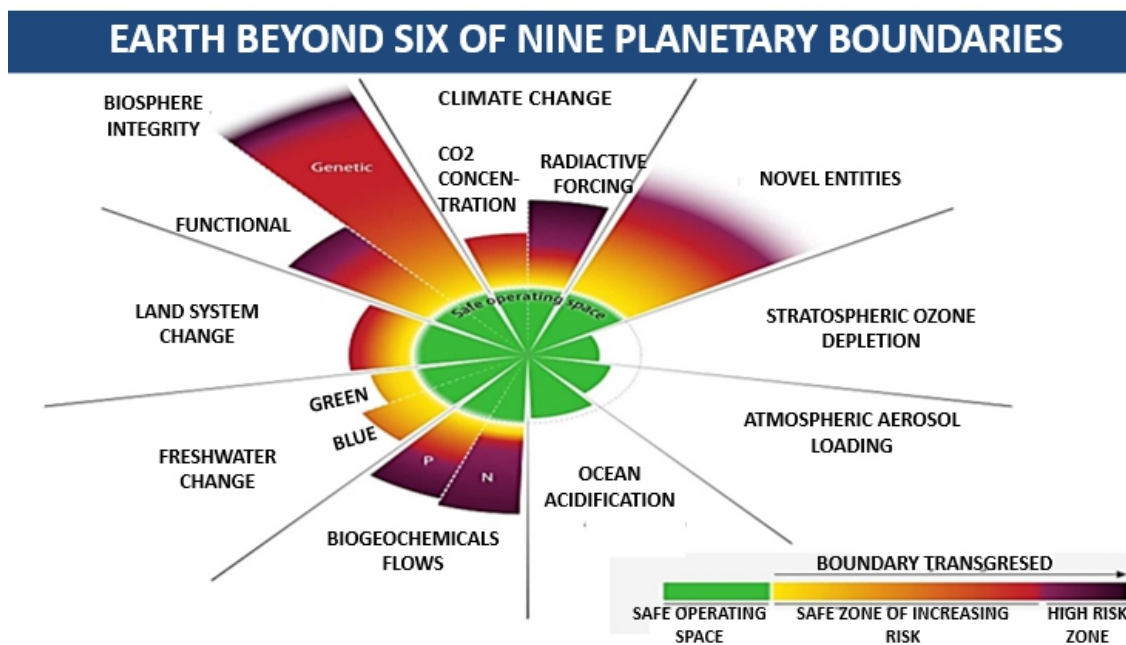


Figura 2. La Tierra más allá de los 9 Límites Planetarios

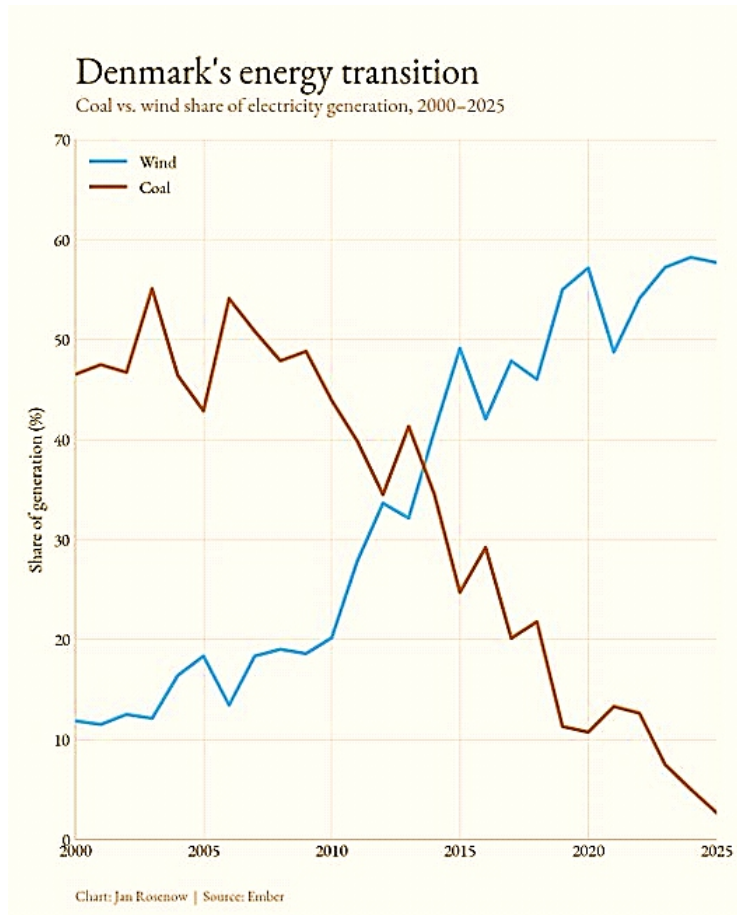


Figura 3. Dinamarca-Energía de transición

Bibliografía

1. Garza, J., (2025). Pandemia por COVID-19 Pendiente el Rediseño de las Estructuras Gubernamentales y de la Organización Académica y Social. En: Reflexiones Desde la Bioética en la Pandemia de COVID-19 (162-176). IJ-UNAM <https://www.bioetica.unam.mx/?p=7800>
2. Crocker, R., Garza, J., & Vázquez, J. L. (2021). La Crisis en el Abordaje Epidemiológico a Escala Planetaria con Énfasis en México. En Educación Médica en un Mundo en Crisis (29-46). México: AMFEM <https://www.amfem.edu.mx/phocadownload/publicaciones/educacion-medica-en-crisis.pdf>
3. Garza, J., (2021). Modalidad del Trabajo Intersectorial para Alcanzar Una Salud -Instituciones, Disciplinas, Sectores, Armonización para un Esfuerzo Exitoso, Concurrente. En: III Seminario Internacional de Salud Pública Veterinaria y el I Seminario Internacional de la Red SAPUVET-OHIN. Conference paper
4. Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37), eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>



DESARROLLO DE DISPOSITIVOS MICROMÉTRICOS FLEXIBLES PARA APLICACIONES MÉDICAS

DRA. NATIELY HERNÁNDEZ SEBASTIÁN

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA



En los últimos años el desarrollo de dispositivos micrométricos flexibles se ha posicionado como una línea de desarrollo estratégico en múltiples áreas de investigación, incluyendo las comunicaciones, la energía, la industria automotriz, la electrónica de consumo, y de manera destacada, la medicina. En particular, los Sistemas Microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés) han permitido la integración de sensores y actuadores en escalas reducidas, sentando las bases para el desarrollo de dispositivos micrométricos de alta precisión, bajo consumo energético y adaptabilidad.

En el ámbito biomédico, los MEMS se conocen como BioMEMS y constituyen una extensión de esta tecnología hacia sistemas diseñados para interactuar con el entorno fisiológico. Su desarrollo ha requerido la incorporación de criterios propios de la ingeniería biomédica, como la biocompatibilidad, la estabilidad en medios biológicos y la confiabilidad en operación a largo plazo. Tanto los MEMS, como los BioMEMS se fabrican mediante tecnologías derivadas de la microelectrónica y la electrónica flexible, en entornos altamente controlados conocidos como salas limpias, donde se dispone de equipamiento especializado para la fabricación de estructuras en microescala.

En el Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. (CIO), el desarrollo de BioMEMS se lleva a cabo en el Laboratorio Nacional en Microtecnología y BiOMEMS (LaNMIb). Este laboratorio articula la infraestructura científica y tecnológica de cuatro instituciones: la Universidad Veracruzana (UV), la Universidad de Guanajuato (UG), la Universidad de la Ciénega del

Estado de Michoacán de Ocampo (UCEMICH) y el CIO. En conjunto, el LaNMIb integra cinco laboratorios (circuitos integrados y MEMS, nanotecnología, neurociencia cognitiva y afectiva, caracterización eléctrica y un cuarto limpio clase ISO 7, así como más de 40 equipos especializados y personal altamente capacitado en microelectrónica, circuitos integrados, MEMS, BioMEMS, materiales y neurociencias.

Esta infraestructura permite cubrir la mayoría de las principales etapas de diseño, fabricación y caracterización de dispositivos micrométricos y BioMEMS. En particular, nuestro grupo de investigación —Dra. Natiely Hernández Sebastián (responsable técnica del LaNMIb), Dra. Sandra Judith Castañeda Palafox, Dr. Bernardino Barrientos García, M.C. Víctor Manuel Carpio Verdín (estudiante de doctorado, Ing. Iván Jaimes de la Sancha (estudiante de maestría), Dr. Wilfrido Calleja Arriaga, Dr. Erik Rene Bojorges Valdez, Dr. Francisco López Huerta— se ha enfocado en desarrollo de dos prototipos: un electrodo de estimulación eléctrica selectiva y no invasiva de la retina, y un sensor de presión inalámbrico, los cuales se describen a continuación.

Electrodo de estimulación eléctrica selectiva y no invasiva de la retina

Este proyecto se enfoca en el desarrollo de un electrodo multisitio que permita aplicar estimulación eléctrica selectiva y variable sobre la superficie anterior de la córnea, con el propósito de inducir la activación y neuromodulación indirecta de la retina y de las estructuras posteriores del sistema visual. La propuesta

plantea ofrecer un método mínimamente invasivo orientado al tratamiento de patologías neurodegenerativas de la retina, entre ellas la degeneración macular relacionada con la edad (DMAE), la retinopatía diabética (RD) y la retinosis pigmentaria (RP).

El diseño del electrodo propuesto se presenta en la Figura 1a. Como puede observarse, el dispositivo consiste en un arreglo de microelectrodos eléctricamente independientes definidos sobre un sustrato flexible de diseño ergonómico (área de estimulación), el cual se posiciona sobre una lente de contacto para su

operación. Cada microelectrodo tiene un tamaño de $250\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ y está conectado a un contacto eléctrico individual mediante una línea metálica conductora. La independencia eléctrica de cada microelectrodo, en combinación con su distribución sobre las diferentes regiones de la superficie corneal (central, paracentral y periférica), permite seleccionar de manera precisa y controlada la zona objetivo de estimulación y ajustar de forma independiente los parámetros eléctricos de la señal aplicada, incluyendo el tipo, la intensidad, la duración y el patrón del estímulo aplicado.

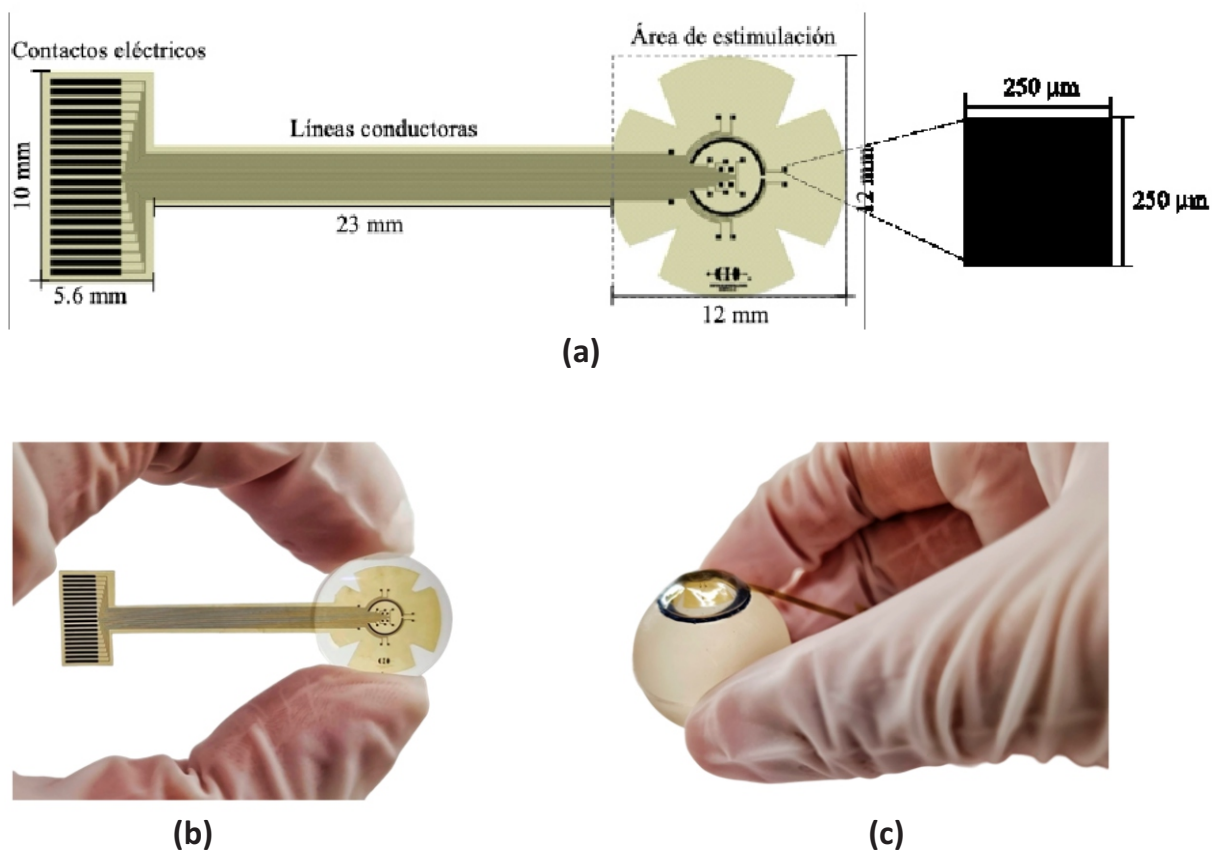


Figura 1. (a) Diseño del electrodo multisitio propuesto, (b) Electrodo fabricado sobre una superficie cóncava de vidrio y (c) electrodo posicionado sobre una lente de contacto y un modelo de ojo humano.

El electrodo multisitio fue fabricado mediante tecnologías de microelectrónica y electrónica flexible, empleando únicamente tres materiales: aluminio y titanio como materiales conductores, y poliimida como sustrato flexible y capa de encapsulamiento. La selección de estos materiales permitió reducir los costos de procesamiento y establecer un proceso de

fabricación simplificado, reproducible y compatible con procesamientos a bajas temperaturas. La Figura 1b, muestra el electrodo fabricado colocado sobre una superficie cóncava de vidrio; mientras que en la Figura 1c se observa el electrodo integrado en una lente de contacto y posicionado sobre un modelo de ojo humano, evidenciando su capacidad de adaptación

mecánica a superficies no planas y geometrías curvas. Entre las principales características del prototipo fabricado destacan su selectividad espacial, flexibilidad mecánica, alta conductividad eléctrica, baja impedancia electroquímica y biocompatibilidad, propiedades que lo hacen adecuado para aplicaciones de estimulación eléctrica transcorneal.

Como trabajo futuro, se contempla la integración del electrodo con un sistema inalámbrico de alimentación y control, con el objetivo de eliminar conexiones externas y desarrollar un dispositivo completamente integrado en una lente de contacto. Además, debido a que la poliimida permite el paso de la luz visible, el dispositivo podría emplearse en otras aplicaciones oftálmicas, como el registro de señales eléctricas retinianas en estudios de electroretinografía.

Sensor de presión inalámbrico

En este proyecto nos encontramos desarrollando un sensor de presión inalámbrico, flexible e implantable diseñado para monitorear de forma continua la presión ventricular. Este tipo de medición es importante porque permite detectar alteraciones cardiovasculares de

manera más precisa que los métodos tradicionales, los cuales suelen ser incómodos, invasivos o limitados para monitoreo continuo.

La Figura 2, muestra el esquema del sistema propuesto. Como se observa, está compuesto por un conjunto implantable y un dispositivo de lectura externo ubicado fuera del cuerpo humano. El conjunto implantable opera sin baterías mediante comunicación inalámbrica basada en resonancia electromagnética. Para ello, integra una bobina planar de doble nivel y un arreglo de dos capacitores sensibles a la presión. Las variaciones de presión producen cambios capacitivos que desplazan la frecuencia de resonancia del implante.

El dispositivo externo genera el campo electromagnético necesario para alimentar inalámbricamente el implante y establecer el acoplamiento resonante entre ambos módulos. Cuando la presión ventricular cambia, la frecuencia de resonancia del implante se desplaza, produciendo variaciones en la impedancia equivalente de la bobina externa. Mediante este principio, la presión ventricular puede monitorearse de forma inalámbrica y en tiempo real.

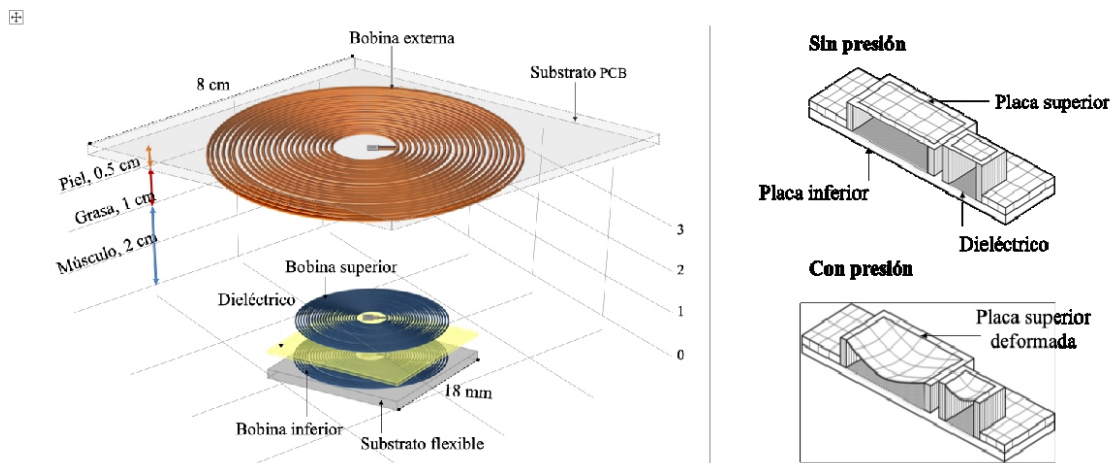


Figura 2. (a) Diagrama esquemático del sensor de presión inalámbrico propuesto y (b) estructura del arreglo de dos sensores capacitivos con y sin presión.

El dispositivo externo se fabricó utilizando técnicas convencionales de electrónica y utilizando componentes discretos montados sobre una tarjeta de circuito impreso (PCB). Por su parte, el conjunto implantable se

desarrolló mediante tecnologías de microelectrónica y electrónica flexible, empleando procesos de fotolitografía, depósito de películas delgadas y técnicas de grabado químico húmedo.

A través de estos procesos se definieron la bobina planar de doble nivel y el arreglo de dos capacitores sensibles a la presión sobre un mismo sustrato flexible, evitando el uso de conexiones híbridas y etapas complejas de ensamblaje. La integración monolítica del elemento sensor e inalámbrico contribuye a mejorar la

estabilidad eléctrica del sistema, la reproducibilidad del proceso de fabricación y la eficiencia del acoplamiento inalámbrico entre el implante y el lector externo. La Figura 3, muestra el sensor de presión inalámbrico fabricado.

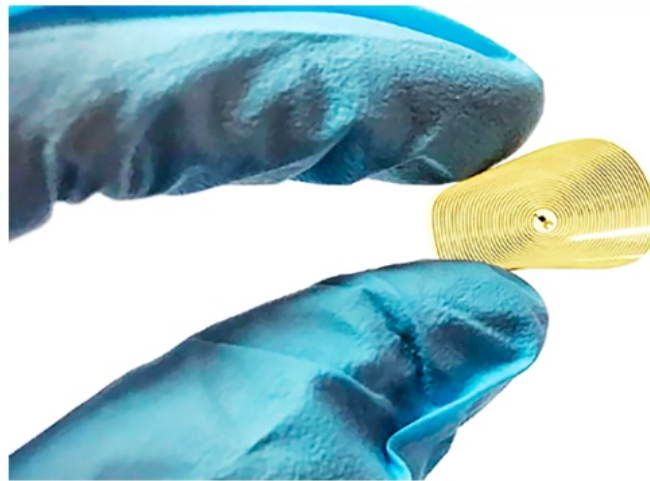


Figura 3. Sensor de presión inalámbrico fabricado, en la parte central se puede observar el elemento sensible a la presión.

Como se observa en la figura anterior, se obtuvo un sensor de presión inalámbrico miniaturizado, robusto y mecánicamente flexible. La arquitectura propuesta, basada en una bobina planar de doble nivel y un arreglo de dos capacitores sensibles a la presión, permitió alcanzar un amplio rango de operación de 5 a 300 mmHg, así como una distancia de transmisión inalámbrica de potencia cercana a 2.5 cm. Gracias a su diseño

flexible y capacidad de miniaturización, este sensor podría adaptarse para la monitorización de presión en distintos órganos y sistemas fisiológicos, incluyendo la aorta, la arteria pulmonar, el ojo y el cerebro. Para aplicaciones intraoculares e intracraneales, será necesario optimizar y reducir las dimensiones de la bobina con el fin de adecuar el dispositivo a las restricciones anatómicas de estas regiones.

