

Sonia Contera
NANOTECNOLOGÍA VIVA

arpa

SUMARIO

PREFACIO Y AGRADECIMIENTOS	11
ABREVIATURAS	15
INTRODUCCIÓN	
Las ciencias convergen en la biología para transformar la medicina	17
CAPÍTULO 1	
La inmersión en la complejidad de la biología	41
CAPÍTULO 2	
Aprender haciendo: Nanotecnología con ADN y con proteínas	101
CAPÍTULO 3	
La nanotecnología en la medicina	137
CAPÍTULO 4	
Ingeniería de tejidos y órganos	186
CAPÍTULO 5	
Conclusiones: La vida lo cambia todo	215
EPÍLOGO	
La biología se convierte en física: ¿Nuestra mayoría de edad como especie tecnológica?	227
NOTAS	247
ANEXOS	263

Para Arturo e Isadora

PREFACIO Y AGRADECIMIENTOS

La convergencia progresiva de las ciencias en el siglo XXI y, en particular, la fusión de disciplinas en la frontera de la física, la nanotecnología, la biología y la medicina, ha compuesto el paisaje de mi propia carrera científica a través de las ciencias, los continentes y las culturas. Tras un periplo de estudios y trabajo que transcurrió primero de la física a la nanotecnología y después a la biología y que me trajo de nuevo a la física, llevándome en el proceso de España a Rusia, China, Chequia, Japón, Dinamarca y el Reino Unido, en 2007 me convertí en codirectora del Instituto de Nanociencia para la Medicina, un programa de investigación en la Oxford Martin School de la Universidad de Oxford. La escuela se creó con una dotación de James y Lillian Martin para convertirse en un centro en el que todas las disciplinas académicas relevantes se reunieran con el objetivo de investigar y debatir los retos y oportunidades del siglo XXI. Animada por la vocación de la Oxford Martin School de comunicarse con el público, empecé a dar conferencias de divulgación sobre nanotecnología y el futuro de la medicina y la biología, que estaban fuertemente arraigadas en mi forma de ver el mundo desde el punto de vista de la física, que es mi profesión y mi vocación. A pesar del ritmo acelerado de la convergencia cien-

tífica, la comunidad científica ha sido más lenta a la hora de reflexionar sobre cómo la fusión de disciplinas está transformando las formas de trabajar y pensar en la naturaleza, por lo que mis conferencias eran también intentos de satisfacer mis propias necesidades como profesional de la ciencia. Hablar de estos temas en público ante audiencias científicas y no científicas se ha convertido en una parte importante de mi actividad académica, y me ha llevado a reflexionar más sobre las implicaciones, historia y contexto de mi investigación. Ahora doy estas conferencias en muchos países y a una amplia variedad de audiencias. Esto me ha permitido conectar con comunidades muy diversas y darme cuenta de la gran curiosidad del público sobre estas tecnologías convergentes que tanto definen nuestro presente y muy probablemente conformarán nuestro futuro.

Así que cuando mi editora en Princeton University Press, Ingrid Gnerlich, me propuso escribir este libro, decidí hacerlo a pesar de tener una pesada carga académica y de investigación y dos hijos pequeños. Gente de todas las procedencias parece disfrutar de las historias científicas que cuento. Vivimos tiempos apasionantes; los avances en nuestra comprensión de la realidad física y biológica que nos rodea y nos rodeará se están acelerando exponencialmente. La convergencia de las ciencias está trayendo una revolución no solo en la tecnología, sino también en nuestra relación física, cultural y filosófica con el mundo material. Es el momento de pensar y hablar sobre un presente que cambia rápidamente, y de imaginar colectivamente los futuros positivos que nuestras nuevas tecnologías podrían hacer posibles. Es mi intención que este libro contribuya a la conversación de manera constructiva.

Agradezco el apoyo y la paciencia de mi familia, y el amable estímulo de mi editora; agradezco también a los amigos y colegas que han leído y comentado las primeras versiones del

manuscrito: Charles Olsen, Rosario Ruibal Villaseñor, Alberto Merchante, Ibon Santiago y Lina Gálvez. También me he beneficiado de la generosidad del colectivo de artistas teamLab, que me proporcionaron imágenes e inspiraron algunas de las ideas del libro. Muchas conversaciones han sido importantes para dar forma a mi pensamiento, especialmente las mantenidas con el físico Jacob Seifert, mi director de doctorado Hiroshi Iwasaki, la directora de cine Alison Rose y la historiadora de las matemáticas Agathe Keller.

Prefacio a la edición en español

La primera edición de este libro se publicó en inglés con el título *Nano comes to life: How nanotechnology is transforming medicine and the future of biology* en 2019, simultáneamente en Estados Unidos y en el Reino Unido. El libro ha cambiado mi vida de muchas maneras y ha atraído la atención del público científico y no científico en muchos lugares del mundo, motivando nuevas ediciones en inglés y otros idiomas. Es una alegría para mí poder traducir el libro para Arpa Editores y conectar así con los lectores en mi lengua materna. Esta oportunidad se propició a través de una entrevista sobre el libro que me hizo Javier Salas para el periódico *El País* en 2022, que leyó mi editor, Joaquín Palau. Les estoy muy agradecida a los dos.

Esta edición en español es oportuna porque los temas centrales del libro, la nanotecnología en medicina y biología, la transformación de las ciencias y tecnologías que convergen con la biología en el siglo XXI y su efecto en las personas, han tomado un carácter importante desde el inicio de la pandemia de COVID-19 a principios de 2020. Cuando las nanovacunas de Moderna y BioNTech-Pfizer hicieron su aparición casi milagrosa en 2021 transformaron nuestras vidas

y el futuro de la medicina para siempre. La nanomedicina es ya una realidad. Además de las nanovacunas, cuya irrupción anticipé en la primera edición del libro, se han materializado otros avances que también pronostiqué, por ejemplo, la llegada de Alphafold, la empresa de Google DeepMind que usa la inteligencia artificial para calcular la estructura de las proteínas y que también representa un avance muy transformador. Aunque la traducción es fiel al original en inglés, he añadido algunos párrafos a la edición en español para ponerla al día con estos nuevos adelantos.

Oxford, 22 de octubre de 2022

ABREVIATURAS

ADN:	ácido desoxirribonucleico
IA:	inteligencia artificial
PET:	tomografía por emisión de positrones
Unidades de longitud:	m, metro; mm, milímetro; cm, centímetro; nm, nanómetro
ARN:	ácido ribonucleico
A, C, G, T:	adenina, citosina, guanina y timina, las bases del ADN
STM:	microscopía de barrido tunneling / microscopio
AFM:	microscopía de fuerza atómica / microscopio
C:	grado Celsius (temperatura)
ATP:	trifosfato de adenosina
3-D:	tres-dimensiones
RMN:	resonancia magnética nuclear
SARM:	<i>Staphylococcus aureus</i> resistente a la meticilina
FDA:	Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos

INTRODUCCIÓN

LAS CIENCIAS CONVERGEN EN LA BIOLOGÍA PARA TRANSFORMAR LA MEDICINA

La biología, el estudio de la vida en la Tierra, se ha convertido en el tema más investigado por la ciencia moderna. Más allá de las perpetuas preocupaciones humanas por la salud, la mortalidad y la búsqueda de nuestro lugar e identidad en el universo, el poder oculto en la complejidad de la biología está haciendo que casi todas las ramas de la ciencia y la tecnología graviten hacia el estudio de la vida de una manera o de otra. La biología está dejando de ser territorio soberano de biólogos, bioquímicos, farmacólogos y médicos; en el siglo XXI, la física, las matemáticas, las ingenierías y las ciencias de la computación y la robótica convergen con las disciplinas biológicas más tradicionales para buscar una comprensión más profunda de la vida en todas sus multifacéticas y dinámicas estructuras, funciones y manifestaciones. En el complejo y turbulento tiempo en el que vivimos, donde los humanos nos sentimos cada vez más desorientados, el funcionamiento interno de la biología y su profunda relación con el significado de la vida y el origen de la inteligencia se han convertido en el foco de la creatividad humana, engendrando innovaciones tecnológicas, sociales y culturales que

en el mejor caso contribuirán a la supervivencia y el progreso de la humanidad, o en el peor podrían llevarnos a la extinción. Como profetizaron artistas, filósofos y escritores del siglo XIX, expandir el dominio de la tecnología a la biología cambia fundamentalmente el sentido mismo de la ciencia y del científico o tecnólogo. En el siglo XXI las profecías se hacen realidad y el poder que nos permite usar la biología en nuestras invenciones tecnológicas se ha materializado, ya está aquí.

El apetito de las ciencias por la biología busca satisfacción en todas sus dimensiones espaciales (desde las moléculas de tamaño nanométrico, hasta las células que se miden en micras y los animales y plantas eucariotas que alcanzan metros de largo¹) y en todas sus manifestaciones, desde la alucinante diversidad de forma y acción que existe en su inventario molecular, hasta las fuerzas y procesos que impulsan el preciso ensamblaje de una intrincada proteína, la membrana lipídica de las células o de un cromosoma de ADN. En el siglo XXI la ciencia busca conocimiento en las moléculas individuales, las células, los tejidos, los organismos y los ecosistemas; este esfuerzo e interés incluye el estudio de cómo las estructuras biológicas dan lugar a las «inteligencias» individuales y colectivas² que permiten a los seres vivos sobrevivir en la Tierra.

Aparte de la búsqueda pura del conocimiento, el beneficio económico y la influencia o incluso la transformación social son los motores cotidianos de la ciencia y aún más de la financiación de la investigación. En el complejo contexto social en el que se desarrolla la actividad científica, la motivación de los investigadores por todo lo biológico es a menudo tecnológica. Los beneficios tecnológicos potenciales de la biología son tan diversos como las nuevas disciplinas que evolucionan a partir de los conocimientos extraídos de ella. Por ejemplo, los informáticos están muy interesados en

conocer los detalles de la organización del cerebro humano para poder reflejar la conectividad en capas entre sus neuronas en la estructura de sus algoritmos; esperan que esto conduzca a una inteligencia artificial (IA) muy mejorada, así como a una mejor comprensión de nuestra propia capacidad de pensamiento. Los científicos de materiales y los roboticistas se inspiran en el montaje de estructuras biológicas para diseñar nuevos materiales y robots «bioinspirados». En los departamentos de física, los científicos estudian las proteínas responsables de la fotosíntesis en plantas y bacterias, buscando recetas biológicas que puedan adoptarse en los ordenadores cuánticos del futuro.

Por muy vigorosa y dedicada que sea la actividad de investigación biológica de estos nuevos actores, la medicina sigue ocupando el centro del escenario como principal motor intelectual, social y económico de la investigación biológica. La medicina ayuda a atraer los fondos para hacer investigación, pero fundamentalmente desempeña el papel de integradora del conocimiento. Las ciencias y tecnologías que convergen en la biología llegan por caminos diferentes y apuntan a objetivos dispares, pero la medicina disipa las barreras culturales entre disciplinas, facilitando su fusión en la búsqueda de mejores estrategias para descubrir las causas últimas de la enfermedad y mejores intervenciones para preservar y restaurar la salud.

Entender la enfermedad y curarla es un reto tan complejo que requiere trabajar en equipo, «todos a una», combinando todos los conocimientos técnicos y científicos disponibles. La investigación médica de vanguardia ya combina los últimos avances en IA, ciencia de los materiales y robótica, y sin duda utilizará los ordenadores cuánticos o neuromórficos cuando estén disponibles. Como puede atestiguar cualquiera que haya estado en un hospital moderno, la mayoría de las tecnologías humanas acaban siendo adaptadas para su

uso en la clínica de un modo u otro: desde el humilde termómetro hasta la física de los positrones en los escáneres PET para obtener imágenes de tumores, las aplicaciones de los teléfonos móviles para controlar la fertilidad, y la edición de genes para erradicar enfermedades. El hospital es el medio de cultivo más propicio para que el conocimiento científico y técnico se conciba, nazca, se combine con otras ramas de la ciencia y crezca.

La diversidad, la intensidad y la velocidad de avance de la investigación actual indican inequívocamente que vivimos en tiempos prerrevolucionarios tanto en biología como en medicina. Las respuestas a las antiguas y eternas preguntas que han ocupado a los seres humanos desde sus primeros pasos, el origen y la diversidad de la vida y la procedencia de nuestra inteligencia y consciencia y nuestro papel en el universo, están todavía lejos de ser encontradas. Sin embargo, las aceleradas y cada vez más potentes fusiones interdisciplinarias nos hacen sentir que nos encontramos ante un punto de inflexión, y que pronto nos deslizaremos irremediablemente hacia el advenimiento de las tecnologías que transformarán nuestra comprensión y el control de nuestra propia biología. De manera extraordinariamente novedosa y eficaz, estas nos darán quizá los poderes para curarnos y prolongar y transformar nuestras vidas. O por lo menos con eso soñamos los que nos dedicamos a la ciencia, y las sociedades y la historia que nos empujan hacia esas visiones.

NANOTECNOLOGÍA EN BIOLOGÍA Y MEDICINA

Un paso necesario hacia esta situación prerrevolucionaria en biología fue, y sigue siendo, el desarrollo de la nanotecnología: la capacidad de visualizar, interactuar, manipular y crear materia a escala nanométrica. Esto se debe principalmente a