



Origami de ADN: ciencia doblada en creatividad y función

Dra. Norma Y. Hernández Saavedra

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Foto: shironanakajusinau

Tema

El origami de ADN es una técnica innovadora en el ámbito de la biotecnología que permite diseñar y construir estructuras tridimensionales de ADN a escala nanométrica. Esta técnica se basa en la capacidad del ADN para formar enlaces específicos, aprovechando su conocida estructura de doble hélice, lo que permite la creación de formas complejas y personalizadas con aplicación en los campos de medicina, tecnología e investigación científica.

1. Introducción

El origami de ADN es una nanotecnología innovadora en el ámbito de la biotecnología que permite diseñar y construir estructuras tridimensionales de ácido desoxirribonucleico (ADN) que utiliza combinaciones programadas de oligonucleótidos complementarios cortos para plegar una gran cadena única de ADN en formas precisas en dos y tres dimensiones (2D y 3D, respectivamente). Este método se

basa en la capacidad del ADN para formar enlaces específicos, complementarios (Fig. 1, $T=A$ y $G=C$), aprovechando su conocida estructura de doble hélice, lo que permite la creación de formas complejas y personalizadas.

Como sabemos, el ADN (ácido desoxirribonucleico) es la molécula que contiene la información genética necesaria para el desarrollo, funcionamiento y reproducción de todos los seres vivos. Como se muestra en la figura 1, esta molécula está formada por unidades llamadas nucleótidos (Fig. 1-1 a 1-4). Cada nucleótido tiene un grupo fosfato (indicado en la Fig. 1 con una P en círculos anaranjados), un azúcar (desoxirribosa, indicado en la Fig. 1 con pentágonos violeta) y una de cuatro bases nitrogenadas: 1) adenina (A), 2) timina (T), 3) citosina (C) y 4) guanina (G) (Martínez-Frías, 2010). Esta molécula que tiene forma similar a una escalera de caracol (doble hélice), actúa como un manual de instrucciones o “plano biológico” para construir proteínas y otros componentes de las células (NIH, 2026; Fig. 1).

2. Nanotecnología de Origami de ADN

A nivel científico, el origami de ADN es una técnica creada en 2006 en la que se utiliza una hebra larga de ADN como "andamio" y cientos de hebras cortas como "grapas" que se unen mediante pares de bases complementarios para autoensamblar nanoestructuras en 2D y 3D (Rothmund, 2006). El exquisito control de forma (a nanoescala) de este material inherentemente biocompatible (Fig. 2), se combina con la capacidad de abordar espacialmente las estructuras de origami con diversas cargas, como: fármacos, anticuerpos, secuencias de ácidos nucleicos, moléculas pequeñas y partículas inorgánicas. Esta flexibilidad programable permite la fabricación de dispositivos nanométricos precisos, que ya han demostrado un gran potencial para aplicaciones biomédicas como la administración de fármacos, la biodetección (método tecnológico diseñado para identificar y cuantificar sustancias mediante el uso de componentes de origen biológicotecnológico) y la formación de nanoporos sintéticos (canales a escala nanométrica incorporados artificialmente en membranas de materiales inorgánicos). A diferencia de los nanoporos biológicos, no dependen de proteínas naturales, lo que los hace mucho más resistentes y versátiles para la ingeniería (Kearney et al., 2016).

2.1 ¿Cómo se fabrica el origami de ADN?

El origami de ADN se basa en el plegado de una larga cadena de ADN monocatenaria o andamiaje, en una forma prediseñada utilizando cientos de hebras individuales de ADN más pequeñas llamadas grapas. Cada grapa tiene múltiples sitios de unión capaces de unir las partes más distantes de la hebra del andamiaje mediante apareamiento de bases cruzado. Un origami de ADN plano, típico, puede contener hasta 200 hebras de grapas. Las estructuras planas se pueden ensamblar en estructuras tridimensionales más complejas. El

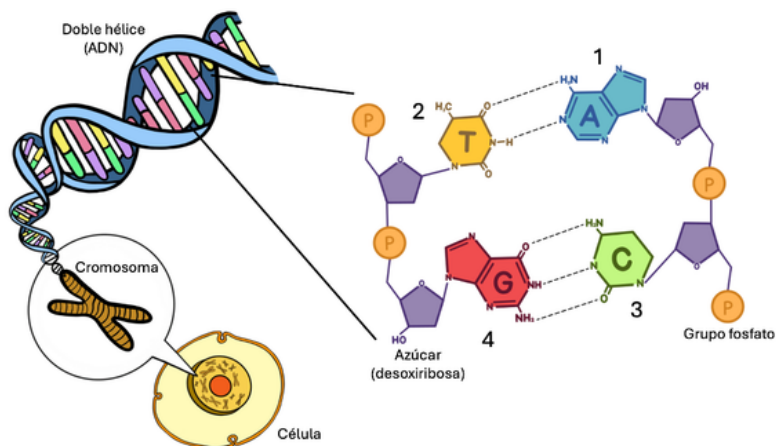


Figura 1. La imagen ilustra la estructura jerárquica del material genético, desde la célula y el núcleo hasta las bases nitrogenadas que forman el ADN. En el ADN, las bases específicas se emparejan mediante enlaces de hidrógeno: adenina (A) con timina (T) y citosina (C) con guanina (G). Cada nucleótido, el componente básico del ADN, consta de un grupo fosfato (P), un azúcar (desoxirribosa) y una base nitrogenada, que en conjunto forman la estructura de doble hélice de la molécula de ADN (Canva).

autoensamblaje en un solo paso se utiliza para construir origami de ADN, donde se añade un exceso de grapas a una mezcla de reacción con el andamiaje. Las estructuras de origami de ADN se diseñan computacionalmente con la ayuda de software de diseño (Fig. 3).

El proceso, consta básicamente de tres pasos: 1) La selección y/o diseño de la secuencia de ADN. Se elige una hebra larga de ADN que actuará como el "andamiaje" para la estructura diseñada. Esta hebra larga es fundamental, ya que determinará la forma básica de la estructura final. 2) El diseño de las secuencias cortas. Se diseñan cuidadosamente secuencias cortas de ADN que se unirán a la hebra larga en

lugares específicos. Estas secuencias actúan como "grapas" moleculares, doblando y asegurando la hebra larga en la forma tridimensional deseada. 3) Ensamblaje. Al mezclar la hebra larga con las secuencias cortas en condiciones controladas, el ADN se autoensambla de manera natural en la estructura tridimensional planeada, gracias a la complementariedad de las bases nucleotídicas (Fig. 3). Finalmente, se llevan dos pasos de verificación, el de primera línea es la electroforesis en gel o mediante espectroscopía (Fig. 4A), mientras que la segunda es la caracterización mediante microscopía electrónica (Fig. 4B).

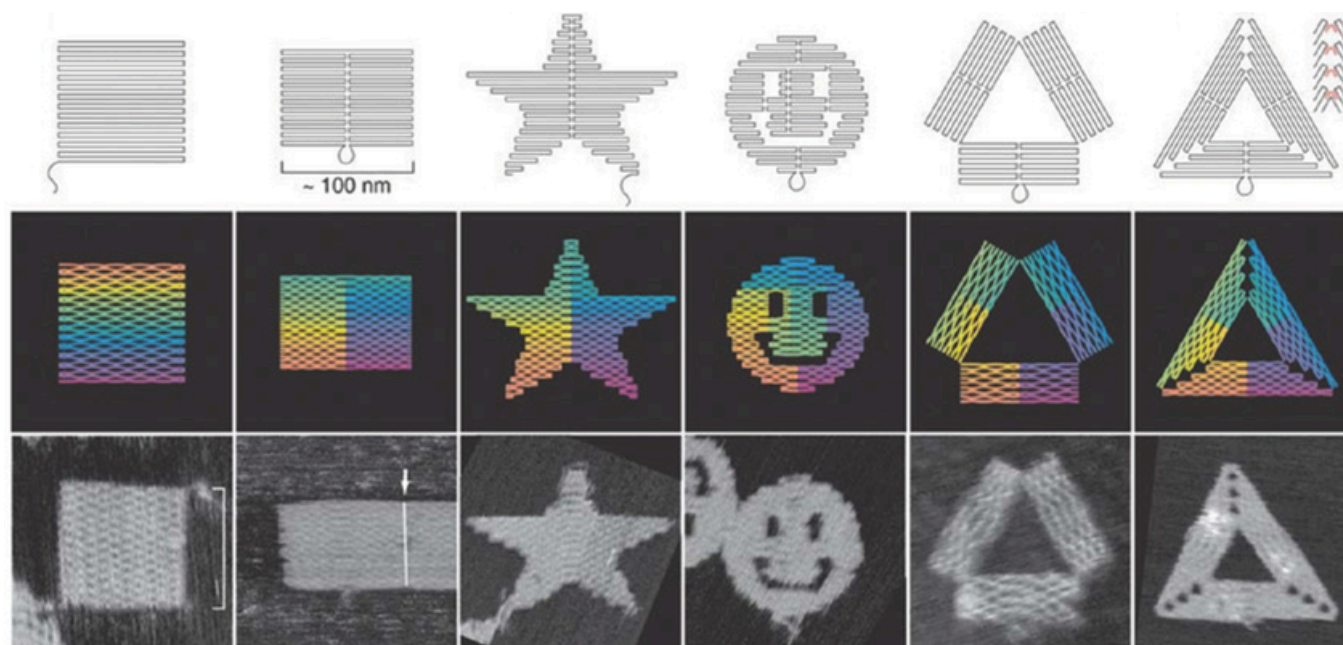


Figura 2. Ejemplos de estructuras en 2D de origami de ADN. Fila superior (dibujo), rutas de plegado. De izquierda a derecha: cuadrado, rectángulo, estrella, disco con tres agujeros, triángulo con dominios rectangulares y triángulo agudo con dominios trapezoidales y puentes entre ellos. Segunda fila: diagramas que muestran la curvatura de las hélices en los cruces (donde las hélices se tocan) y lejos de ellos (donde las hélices se separan). El color indica el índice del par de bases a lo largo de la trayectoria de plegamiento; el rojo corresponde a la primera base y el morado a la número 7000. Tercera fila: imágenes de las estructuras sintetizadas, documentadas mediante Microscopía de Fuerza atómica (AFM, por sus siglas en Inglés) (Modificado de Rothmund, 2006).

3. ¿Para qué sirven los origamis de ADN?

El ADN actúa como portador fundamental de información genética, y sus propiedades únicas le permiten usarse como un componente estructural versátil para la ingeniería y el autoensamblaje de nanoestructuras. La fabricación de plantillas de ADN ha mejorado significativamente las nanoestructuras de ADN autoensambladas, y este progreso es muy evidente en el campo de la nanotecnología del ADN, especialmente en el origami de ADN, que es altamente efectivo para la síntesis ascendente de nanoestructuras definidas con precisión, cuyo tamaño varía desde decenas de nanómetros hasta submicrómetros. Las notables capacidades del origami de ADN abren numerosas posibilidades en el contexto de las aplicaciones biotecnológicas y tecnológicas (Tabla 1). En la literatura se han sugerido muchas aplicaciones potenciales, incluidos la

inmovilización de enzimas, los sistemas de administración de fármacos y el autoensamblaje nanotecnológico de materiales, etc. Aunque el ADN no es la elección natural para construir estructuras activas para aplicaciones nanorrobóticas, debido a su falta de versatilidad estructural y catalítica, ofrece excelentes andamiajes para el autoensamblaje dirigido de materiales a escala nanométrica, desde nanopartículas hasta proteínas, con posibles aplicaciones en la construcción de dispositivos nanoelectrónicos/nanofotónicos y nanoarreglos de proteínas/ligandos (Lin et al., 2006).

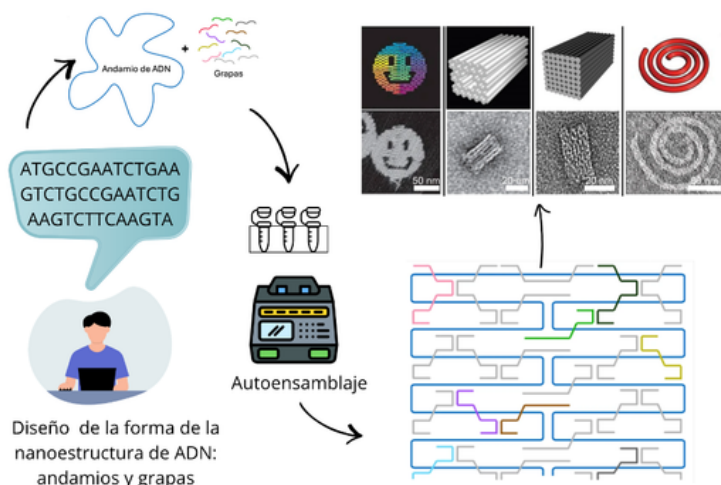


Figura 3. Esquema del proceso de fabricación del origami de ADN. Diseño, síntesis de precursores y autoensamblaje. Un ADN de andamiaje monocatenario largo (azul) está plegado por un conjunto de grapas cortas (coloreadas) en una forma prescrita. En la parte superior derecha se muestran ejemplos de origami de ADN reales (línea superior, diseño; línea inferior microfotografías de vitas de microfotografía electrónica de transmisión (Kearney et al., 2016; Zhou et al., 2023)).

4. Áreas de aplicación del modelo origami de ADN

El origami de ADN tiene un vasto potencial aplicación en varias áreas, entre las que se pueden mencionar (Fig. 5):

1. **Investigación científica:** Desarrollo de modelos detallados para estudiar interacciones moleculares complejas y comprender mejor los mecanismos biológicos.
2. **Tecnología:** Fabricación de circuitos y dispositivos electrónicos a escala nanométrica, abriendo nuevas posibilidades en el diseño de componentes electrónicos.
3. **Medicina:** Creación de nanorobots capaces de transportar medicamentos directamente a células específicas, aumentando la eficiencia y reduciendo efectos secundarios.
4. **Diseño:** Los científicos utilizan software especializado como Cadnano para programar cómo deben plegarse las hebras a escala molecular.

Las ventajas del uso de la tecnología del origami de ADN son principalmente su:

1. **Precisión:** Permite un control extremadamente preciso sobre la forma y el tamaño de las estructuras, lo que es crucial para aplicaciones delicadas.
2. **Escalabilidad:** Ofrece la posibilidad de diseñar desde estructuras relativamente simples hasta las más complejas, adaptándose a las necesidades del proyecto.
3. **Versatilidad:** Es adaptable a una amplia gama de aplicaciones, gracias a su capacidad para formar una diversidad de estructuras.

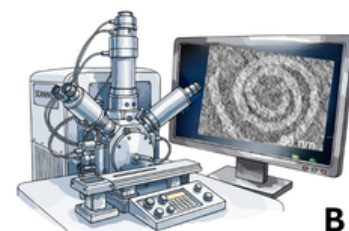


Electroforesis

A



Espectroscopia



Microscopía electrónica

B

Figura 4. Métodos de verificación en la fabricación de origami de ADN (Canva).

Tabla 1. Funciones de nanomateriales basados en origami de ADN (elaborado a partir de Zhan et al., 2023).

Nanomateriales basados en ADN Origami		Función
Nanomateriales inorgánicos	Sílice y compuestos	Aumentar la estabilidad estructural y funcional de nanoestructuras diseñadas a medida, permitiéndoles sobrevivir en entornos biológicos hostiles (como dentro del cuerpo humano) y facilitando su uso en aplicaciones avanzadas de nanotecnología.
	Fosfato de calcio y nanotubos de carbono	Diseñados para maximizar la eficacia terapéutica, proteger el material genético de carga y permitir una liberación controlada en el lugar de la enfermedad.
	Nanocúmulos metálicos, semiconductores y magnéticos	Construir nanomáquinas y sensores inteligentes que aprovechan la capacidad de reconocimiento biológico del ADN y la funcionalidad inorgánica de los metales/semiconductores.
Nanomateriales biológicamente relevantes	Polímeros	Diseñar herramientas personalizadas que pueden navegar por el entorno biológico, interactuar con células de manera programada y liberar carga útil de forma controlada.
	Enzimas	"Andamio" o "caja" programable que permite controlar la posición, orientación y actividad de las enzimas en escalas nanométricas para aplicaciones en bioingeniería, medicina y ciencia de materiales.
	Proteínas y otras biomoléculas	Herramientas de ingeniería para interactuar con el entorno celular, diagnosticar enfermedades y entregar terapias de manera dirigida y eficiente.
Membranas nanoingenierizadas con origami de ADN	Autoensamblaje guiado de membranas	Ingeniería de superficies celulares, administración dirigida de fármacos y creación de biomateriales sintéticos funcionales. Esta técnica permite organizar nanoestructuras de ADN sobre bicapas lipídicas (membranas) para interactuar con células de manera precisa.
	Manipulación de membranas preexistentes	
	Nanoporos de ADN	
Nanofotónica basada en origami de ADN	Nanopartículas metálicas	Para construir “nanoestructuras funcionales” con precisión atómica, sirviendo como andamios programables para posicionar componentes (nanopartículas, colorantes) a escala nanométrica
	Funcionalización anisotrópica específica de sitio	
	Superestructuras y nanoestructuras plasmónicas	
Emisores Cuánticos	Control de distancia a nanoescala por ADN Origami	El origami de ADN actúa como una "placa de pruebas" (breadboard) molecular que coloca emisores en hotspots (puntos calientes) con precisión atómica, algo inalcanzable con métodos de nanofabricación tradicionales.
	Control de Orientación por ADN Origami	
Fluorescencia de Emisores Individuales Mejorada por Plasmón	"Plataforma estructural" para organizar emisores y metales, superando los límites de la microscopía óptica convencional para estudiar la vida a nivel molecular.	
Espectroscopía Raman de Superficie de Molécula Individual Mejorada	"Nanoantena" o "caja de herramientas" que organiza nanopartículas metálicas (oro o plata) con precisión extrema, creando "puntos calientes" (hotspots) donde las señales Raman de las moléculas se amplifican hasta cien mil millones de veces.	



Figura 5. Ejemplos de aplicaciones del origami de ADN en biomedicina (Modificado de Chen et al., 2025).

5. Usos específicos y potenciales de los origamis de ADN

En un amplio panorama, el origami de ADN representa un avance significativo en nuestra capacidad para manipular la materia a nivel molecular, proporcionando nuevas soluciones a retos en biotecnología, medicina y más allá. Esta técnica abre puertas a innovaciones que podrían transformar múltiples campos de la ciencia y la tecnología. Prueba de ello se muestra en la Tabla 2, en la que se citan desde las aplicaciones más básicas, hasta las más avanzadas, siendo un recurso potencial que parece estar subexplotado.

Tabla 2. Usos de la tecnología del origami de ADN (elaborado a partir de Wang et al., 2017(1), Wu et al., 2024(2); Fang et al., 2023(3); He et al., 2023(4); Cho et al., 2022(5); Glembockyte et al., 2021(6); Mostafa et al., 2023(7).

Usos del origami de ADN	Descripción	Ref.
Andamiaje para Enzimas	Para organizar enzimas artificiales, mejorando su eficiencia en cascadas bioquímicas.	1
Nanoelectrónica y Materiales Funcionales	Para la construcción de microchips más pequeños utilizando grafeno u otros materiales, así como la fabricación de nanoalambres metálicos.	1
Fabricación de Nanoestructuras Inorgánicas	Para crear "nanomoldes" para dirigir el crecimiento de metales (como oro o plata) o minerales (como la sílice) en formas específicas, permitiendo la síntesis de nanoestructuras no metálicas prediseñadas.	1
Biosensores Nanométricos	Para la detección precisa de biomoléculas, enzimas, virus, microARN y otras sustancias en entornos biológicos, mejorando la sensibilidad del diagnóstico.	2
Desarrollo de Vacunas	Para mejorar el diseño de vacunas recombinantes mediante la estructuración precisa de antígenos	2
Nanomedicina e Inmunoterapia	Para la interacción con el sistema inmunológico, manipulación de membranas lipídicas y regulación de procesos bioquímicos.	2
Nanorrobótica y Estudios de Biología Molecular	Para la construcción de nanorobots capaces de realizar tareas médicas específicas, como la activación de receptores celulares.	2
Ensamblaje de Nanoestructuras	Permiten la disposición precisa de materiales con resolución menor a 10 nanómetros, son útiles para la creación de poliedros de alambre o estructuras 3D complejas	3
Ingeniería de Superficies Celulares	Para hacer funcional la superficie de células, facilitando el estudio y control de su comportamiento, así como en la creación de células sintéticas.	3
Sensores Biomoleculares y Diagnóstico	Para el desarrollo de biosensores y en la detección de enfermedades, permitiendo la monitorización en tiempo real de la dinámica microambiental de la membrana celular. Elaboración de sensores con límites de detección ultra bajos para identificar moléculas, incluyendo virus o biomarcadores de enfermedades al concentrar la luz en volúmenes extremadamente pequeños.	3, 4, 5, 7
Administración de Fármacos (Drug Delivery):	Para transportar medicamentos directamente a células diana (especialmente en tratamientos contra el cáncer), mejorando la precisión y reduciendo la toxicidad dada su biocompatibilidad y capacidad de diseño.	3, 4
Nanoporos Artificiales y Transporte Molecular	Para construir nanoporos sintéticos (canales) que cruzan bicapas lipídicas, lo que permite el transporte controlado de iones y moléculas, simulando proteínas de membrana naturales.	3

Tabla 2. Usos de la tecnología del origami de ADN (elaborado a partir de Wang et al., 2017(1), Wu et al., 2024(2); Fang et al., 2023(3); He et al., 2023(4); Cho et al., 2022(5); Glembockyte et al., 2021(6); Mostafa et al., 2023(7). Continuación...

Computación Molecular	Cómo estructuras de ADN para almacenamiento de datos y procesamiento de información a nivel molecular.	4
Biofísica y Ciencias de los Materiales	Para la construcción de citoesqueletos sintético y estudios de interacción proteína-ADN.	4
Nanofotónica y Plasmonica	Para la creación de nanoantenas ópticas ultrapequeñas para dirigir la emisión de luz de una sola molécula en una dirección específica.	5
Dispositivos Optoelectrónicos	Para mejorar el diseño de diodos orgánicos emisores de luz (OLEDs) y fuentes de fotón único mediante el posicionamiento preciso de moléculas.	5
Bioimagen y Medicina	Para el desarrollo de marcadores fluorescentes precisos para investigación biológica y técnicas avanzadas de diagnóstico de enfermedades.	5
Investigación fundamental	Para estudiar fenómenos cuánticos al colocar emisores dentro de nanocavidades plasmónicas (efecto Purcell).	5
Detección de Moléculas Individuales	Para detectar concentraciones bajísimas de biomoléculas (ARN, ADN, proteínas) al intensificar la señal fluorescente de un solo marcador (Single-Molecule Sensing).	6
Nanoscopía y Bioimagen Avanzada	Para visualizar estructuras biológicas con una resolución espacial y temporal mucho mayor que los métodos de microscopía convencionales, superando los límites de difracción de la luz.	6
Nanoantenas de ADN (DNA Nanoantennas)	Para aumentar la fotoestabilidad de los fluoróforos (evitando que se "apaguen" rápido o sufran fotoblanqueo) y mejorar la intensidad de la señal (hasta más de 1600 veces en algunos casos)	6
Biofísica de molécula única	Ayuda a estudiar procesos biológicos rápidos, como el plegamiento de proteínas o interacciones moleculares, gracias a la alta resolución temporal que proporciona.	6
Diagnóstico "Point-of-Care" (en el lugar de atención)	Para inmovilizar emisores de luz en "hotspots" (puntos calientes) plasmónicos diseñados a medida permite el desarrollo de pruebas diagnósticas rápidas y portátiles.	6
Creación de Nanoantenas de Alta Precisión (DONA)	Para posicionar nanopartículas metálicas a distancias muy pequeñas (1-2 nm), lo que es crucial para maximizar el efecto SERS, superando la aleatoriedad de las técnicas tradicionales.	7
Detección de Moléculas Individuales (Single-Molecule SERS):	Para colocar una sola molécula analito en el centro de un hotspot (espacio interparticular) para analizar su huella dactilar vibracional única.	7
Caracterización de Biomoléculas	Para estudiar proteínas (como citocromo c, peroxidasa de rábano) y otras moléculas a nivel de una sola unidad.	7
Detección de Contaminantes o Analitos Específicos	Para medir trazas de sustancias, por ejemplo, dietilestilbestrol (DES) en alimentos, utilizando aptámeros (ADN corto) funcionales en la estructura de origami.	7
Estudios Estructurales y Físicoquímicos	Para explorar fenómenos espectroscópicos sutiles, como la sustitución isotópica y el ensanchamiento homogéneo de los picos Raman en moléculas individuales.	7

Sin, embargo, a pesar de la disponibilidad de diversas herramientas para diseñar y ensamblar estructuras de origami de ADN, aún hay importantes desafíos para su aplicación práctica generalizada fuera del ámbito académico. Entre los problemas clave podemos mencionar (Chen et al., 2025; Zhou et al., 2023):

- El largo tiempo de los procesos de fabricación.
- El alto costo de las grapas de oligonucleótidos.
- La estabilidad de las nanoestructuras de ADN en condiciones fisiológicas debido a su dependencia de los iones Mg_2 .
- Diversidad química limitada a pesar de su alta programabilidad. Actualmente, métodos como la amplificación por PCR son los más avanzados para la producción rentable de andamios y grapas, mientras que enfoques como la producción de fagos genéticamente modificados son prometedores para la síntesis a gran escala.
- Otros aspectos muy relevantes como lo son: provocar una respuesta inmune y/o una regulación génica no deseada, así como la posibilidad de si integración (a largo plazo) en el genoma.

6. Conclusiones

Para utilizar eficazmente las estructuras de origami de ADN en la administración clínica de fármacos, es crucial profundizar en la comprensión de su farmacocinética y farmacodinámica en organismos vivos, garantizando así su seguridad y eficacia. Abordar los posibles efectos adversos, como la respuesta inmunitaria y la interferencia con la regulación génica endógena, sigue siendo un reto importante en este campo. Estrategias como las modificaciones químicas de las cadenas de ADN pueden ayudar a mejorar la biocompatibilidad y reducir los riesgos, allanando el camino para aplicaciones terapéuticas más seguras.

A medida que los esfuerzos se orientan hacia la comercialización, se exploran estrategias como la combinación de la reprogramación de andamios con la recuperación de grapas para prolongar la vida útil, eficientar los costosos reactivos de ADN y minimizar los residuos. Además, se podría mejorar la eficiencia y la rentabilidad de la fabricación al mejorar los métodos de producción y recuperación de grapas, especialmente para aquellos con modificaciones costosas, de forma que se acelere la transición de las tecnologías del origami de ADN a aplicaciones prácticas en el mundo real.



La investigación futura deber centrarse en abordar estos problemas de fabricación y estabilidad, explorar la funcionalidad para la administración dirigida y desarrollar sistemas de liberación controlada, todo ello mientras se superan los obstáculos regulatorios para facilitar su aplicación en clínica y un uso biotecnológico más amplio.

La investigación futura debe centrarse en superar estos desafíos de fabricación y estabilidad, desarrollar funciones de entrega dirigidas y sistemas de liberación controlada, y afrontar los obstáculos regulatorios para facilitar aplicaciones clínicas y biotecnológicas más amplias.

7. Referencias

- Chen, R., Jia, X., Pang, W. *et al.* (2025). Applications of DNA origami in biomedicine: advances, challenges, and prospects. *Adv Compos Hybrid Mater* **8**, 375. <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01457-0>.
- Cho, Y.D., Park, S.H.H., Huh, J-H. *et al.* (2022). DNA as grabbers and steerers of quantum emitters. *Nanophotonics*, **12** (3). <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/nanoph-2022-0602/html>.
- Fang Y, Chen X, Qi Q, Lin M, Liang Q. (2026). DNA Origami and Its Applications in Synthetic Biology. *Adv Sci (Weinh)* **13**(2):e13357. <https://doi.org/10.1002/advs.202513357>.
- Glembockyte V., Grabenhorst L., Trofymchuk K., Tinnefeld K. (2021). DNA Origami Nanoantennas for Fluorescence Enhancement. *Acc. Chem. Res.* **54**, 17, 3338–3348. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.1c00307>.
- He Z, Shi K, Li J, Chao J. (2023). Self-assembly of DNA origami for nanofabrication, biosensing, drug delivery, and computational storage. *iScience*. **26**(5):106638. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106638>.
- Kearney C.J., Lucas C.R., O'Brien F.J., Castro C.E. (2016). DNA Origami: Folded DNA-Nanodevices That Can Direct and Interpret Cell Behavior. *Adv Mater.* **28**(27):5509-24. <https://doi.org/10.1002/adma.201504733>.
- Lin C, Liu Y, Rinker S, Yan H. (2006). DNA tile based self-assembly: building complex nanoarchitectures. *Chem. Phys* **Chem.** **11**;7(8):1641-7. <https://doi.org/10.1002/cphc.200600260>.
- Martínez-Frías M.L. (2010). Estructura y función del ADN y de los genes. I Tipos de alteraciones de la función del gen por mutaciones. *Medicina de Familia. SEMERGEN*, **35**(5):273-277. Doi: [10.1016/j.semerg.2009.12.014](https://doi.org/10.1016/j.semerg.2009.12.014).
- Morneau, M., Whitham, S. (2021). DNA origami. *Nat Rev Methods Primers* **1**,12. <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00013-6> (infografía).
- Mostafa A, Kanehira Y, Dutta A, Kogikoski S Jr, Bald I. (2023). Single-Molecule Surface-Enhanced Raman Scattering Measurements Enabled by Plasmonic DNA Origami Nanoantennas. *J Vis ExpJul* **21**;(197). doi: [10.3791/65310](https://doi.org/10.3791/65310).
- NIH. 2026. Acidos nucleicos. *National Human Genome Research Institute*. Consultado 06/04/2026.
- Rothmund, P. (2006). Folding DNA to create nanoscale shapes and patterns. *Nature* **440**, 297–302. <https://doi.org/10.1038/nature04586>.
- Wang P., Meyer T.A., Pan V., Dutta P.K., Ke Y. (2017). The Beauty and Utility of DNA Origami. *Chem*, **2**(3):359-382. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2017.02.009>.
- Wu Y, Wu X, Tian R, Wang Y, Ding B, Jiang Q. (2024). Precise construction of DNA origami-based materials for functional regulation on biological interface. *Smart Mol.*, **2**(1):e20230032. <https://doi.org/10.1002/smo.20230032>.
- Zhan P., Peil A., Jiang Q., et al. (2023). Recent Advances in DNA Origami-Engineered Nanomaterials and Applications. *Chemical Reviews*. **123** (7):3976-4050. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.3c00028?ref=pdf>
- Zhou, Y., Dong, J., Wang, Q. (2023). Fabricating higher-order functional DNA origami structures to reveal biological processes at multiple scales. *NPG Asia Mater* **15**, 25. <https://doi.org/10.1038/s41427-023-00470-3>.

Cita:

Hernández Saavedra, N. Y. (2026). Origami de ADN: ciencia doblada en creatividad y función. *Biotecnológica Magazine*, **4**(2), 20–31. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20146632>