



Universidad de Jaén

Facultad de Ciencias
Experimentales

AVANCES EN EL DESARROLLO DE VACUNAS EN LA ÚLTIMA DÉCADA

Autor: Ilies Real Fuzeta

Grado: Biología

Fecha: 13/05/2025



CREEA



Universidad de Jaén

Facultad de
Ciencias Experimentales 

Trabajo Fin de Grado

AVANCES EN EL DESARROLLO DE VACUNAS EN LA ÚLTIMA DÉCADA



Alumno/a: Ilies Real Fuzeta
Jaén, Mayo, 2025

ÍNDICE

1. RESUMEN	1
1.1. ABSTRACT	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
2.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS VACUNAS Y SU RELEVANCIA CONTEMPORÁNEA.....	2
2.2. AVANCES TECNOLÓGICOS EN LA VACUNOLOGÍA: DE MÉTODOS MÁS TRADICIONALES A MÁS INNOVADORES.	3
2.2.1. <i>Métodos tradicionales: fundamentos y desafíos</i>	3
2.2.2. <i>Cambio a tecnologías modernas: del ADN recombinante a la vacunología inversa</i>	4
2.2.3. <i>Plataformas innovadoras: ARNm, vectores virales y vacunología estructural</i>	5
2.2.4. <i>Impacto y perspectivas en la última década</i>	6
2.3. ENFERMEDADES EMERGENTES Y REEMERGENTES: UN ACTUAL DESAFÍO PARA LA VACUNOLOGÍA.	7
3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	10
4. METODOLOGÍA	11
4.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	11
4.2. FUENTES DE INFORMACIÓN	11
4.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE FUENTES.....	12
4.4. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS	12
4.5. ANÁLISIS DE DATOS.....	13
4.6. LIMITACIONES METODOLÓGICAS	13
5. RESULTADOS.....	14
5.1. AVANCES EN TECNOLÓGICOS PARA EL DESARROLLO DE VACUNAS	14
5.2. VACUNAS DE ARNM: NOVEDADES Y SUS APLICACIONES	14
5.2.1. <i>Vectores virales y vacunología estructural</i>	15
5.2.2. <i>Métodos tradicionales frente a plataformas modernas: ventajas y retos</i> . 16	
5.3. DESARROLLO DE VACUNAS CONTRA ENFERMEDADES EMERGENTES Y REEMERGENTES.	17

5.3.1. Vacunas para enfermedades emergentes: SARS-CoV-2, ébola y zika ..	17
5.3.2. Avances en vacunas para enfermedades reemergentes: dengue y tuberculosis.	18
5.3.3. Desafíos en el desarrollo de vacunas para patógenos variables.....	19
5.4. DESAFÍOS ÉTICOS, SOCIALES Y ECONÓMICOS EN EL DESARROLLO Y DISTRIBUCIÓN DE VACUNAS.....	20
5.4.1. Inequidad y priorización en el acceso a vacunas.....	20
5.4.2. Hesitación vacunal y el poder de la desinformación.	21
5.4.3. Financiación, producción y escalabilidad: barreras económicas.	23
6. DISCUSIÓN.	24
6.1. AVANCES TECNOLÓGICOS: UN CAMBIO EN LA VACUNOLOGÍA.	24
6.2. RESPUESTA A ENFERMEDADES EMERGENTES Y REEMERGENTES.....	25
6.3. DESAFÍOS ÉTICOS, SOCIALES Y ECONÓMICOS: BARRERAS PERSISTENTES.	26
6.4. IMPLICACIONES Y PERSPECTIVAS.....	27
6.5. LIMITACIONES Y DIRECCIONES FUTURAS.....	28
7. CONCLUSIÓN	29
8. BIBLIOGRAFÍA.....	30

1. RESUMEN

Este trabajo de carácter bibliográfico analiza los avances tecnológicos en vacunología, el impacto de las vacunas sobre enfermedades emergentes, como el SARS-CoV-2 o el ébola, y sobre enfermedades reemergentes como el dengue. Además, se centra en los desafíos éticos, sociales y económicos asociados. Utilizando bases como Pubmed y Scopus, se revisaron un total de 41 artículos para investigar plataformas innovadoras como el ARN mensajero, con vacunas conocidas como Pfizer-BioNTech, vectores virales y vacunología estructural. Estas tecnologías fueron capaces de reducir tiempos de desarrollo de años a meses, superando los límites de métodos tradicionales. Aún así, siguen existiendo barreras como la inequidad en el acceso, la hesitación vacunal y altos costos en la producción. La cooperación internacional, junto con la educación y financiación son clave para garantizar una igualdad y confianza. Los resultados destacan la necesidad de integrar ciencia, ética y política para aumentar el impacto de las vacunas por todo el mundo.

1.1. ABSTRACT

This bibliographic study analyzes technological advances in vaccinology, the impact of vaccines on emerging diseases such as SARS-CoV-2 and Ebola, and re-emerging diseases like dengue. It also focuses on associated ethical, social, and economic challenges. Using databases such as PubMed and Scopus, 41 articles were reviewed to investigate innovative platforms like messenger RNA, with vaccines such as Pfizer-BioNTech, viral vectors, and structural vaccinology. These technologies reduced development times from years to months, overcoming limitations of traditional methods. However, barriers such as inequity in access, vaccine hesitancy, and high production costs persist. International cooperation, alongside education and funding, is key to ensuring equity and trust. The findings highlight the need to integrate science, ethics, and policy to enhance the global impact of vaccines.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Evolución histórica de las vacunas y su relevancia contemporánea

Las vacunas han consolidado su lugar como uno de los avances más significativos de la medicina moderna, mejorando la salud pública al prevenir enfermedades infecciosas que históricamente han causado devastación en poblaciones enteras (Pollard & Bijker, 2021). El origen de estas se remontan al 1796, cuando el médico inglés Edward Jenner desarrolló la primera vacuna contra la viruela, utilizando el virus de la vaccinia para inducir inmunidad en humanos tras observar y analizar que las lecheras que habían sido expuestas a la enfermedad bovina no presentaban síntomas frente a la viruela humana. Este hecho marcó el comienzo de una nueva era en avances científicos que culminaron en la erradicación de esta enfermedad en el 1980, un hito histórico reconocido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Hajj Hussein et al., 2015). A lo largo del siglo XX, con la implementación de programas de vacunación se consiguió el control de enfermedades devastadoras tales como el sarampión, la poliomielitis y la difteria, demostrándose de este modo el potencial y el impacto de estas herramientas en la mejora de la calidad de vida de la población, de su esperanza de vida, su bienestar y de la esperanza (Patel et al., 2020).

La situación respecto a las enfermedades infecciosas ha sufrido una serie de cambios realmente significativos debido a factores como la globalización, el cambio climático, y también a la aparición de nuevos patógenos, entre los que resalta el SARS-CoV-2, responsable de la pandemia del COVID-19, iniciada tal y como su nombre indica en el año 2019 (Van de Vuurst & Escobar, 2023). Este acontecimiento mostró la capacidad que presentaban los patógenos emergentes de desafiar los sistemas de salud globales, a la vez que resaltó lo crucial que es invertir en el desarrollo de nuevas tecnologías para lograr la respuesta más efectiva posible en el ámbito de la salud. Gracias a nuevas tecnologías como el ARN mensajero, se acortaron los tiempos en el desarrollo de las vacunas, este hecho marcó un antes y un después en la vacunología, demostrando lo lejos que puede llegar la investigación científica cuando debe combatir una crisis mundial (Excler et al., 2021). A pesar de estos avances, no todas las personas fueron beneficiadas de la misma forma, lo que ha provocado nuevamente el debate de la justicia en los sistemas

sanitarios. Las vacunas no son exclusivamente una herramienta para la prevención de enfermedades, sino que son el encuentro entre la ciencia, la sociedad y la política (Lazarus et al., 2023). La pandemia del COVID-19 fue motivo de impulso en el desarrollo tecnológico y demostró que sin una cooperación entre diferentes países no hubiera existido un reparto equitativo de las vacunas, sobre todo hacia las personas más necesitadas (Wouters et al., 2021). La búsqueda de los avances tecnológicos que han transformado el desarrollo de las vacunas en los últimos diez años es el objetivo principal de este trabajo, el cual se realizó tras una revisión bibliográfica. Además, busca realizar un análisis, en base a los estudios más actuales, el impacto de estos cambios y los desafíos que aún están por enfrentarse en la salud global, aportando una mirada crítica y bien fundamentada. Antes de hacerlo, se presenta un breve resumen.

2.2. Avances tecnológicos en la vacunología: de métodos más tradicionales a más innovadores

El campo de las vacunas ha sufrido cambios impresionantes, todos estos motivados por la necesidad de enfrentar nuevas enfermedades infecciosas como el SARS-CoV-2, y por la aparición de nuevos avances tecnológicos que han roto las limitaciones de los métodos utilizados anteriormente (Pollard & Bijker, 2021). Si bien antes la metodología usada para el desarrollo de vacunas clásicas era de carácter empírico mediante la atenuación o inactivación de patógenos, en estos últimos años las nuevas plataformas se han visto consolidadas ya que permiten un diseño más rápido, preciso y adaptable a más condiciones (Bernasconi et al., 2020). En este punto del trabajo se procederá al análisis y a la evaluación del cambio desde los métodos más tradicionales hacia las nuevas tecnologías, destacándose su impacto en la prevención de enfermedades alrededor de todo el mundo.

2.2.1. Métodos tradicionales: fundamentos y desafíos

La metodología tradicional del desarrollo de las vacunas, predominantes hasta finales del siglo XX, se basan principalmente en 3 estrategias: subunidades antigénicas, microorganismos atenuados e inactivados (Pollard & Bijker, 2021). En las vacunas atenuadas, como las del sarampión o las de la fiebre amarilla, son

utilizados patógenos vivos debilitados para que se produzca la generación de una respuesta inmune robusta y duradera (Vetter et al., 2018). Las vacunas inactivadas como la de la polio usan microorganismos neutralizados mediante procesos térmicos o químicos, aportando una mayor seguridad aunque regularmente requiriendo refuerzos (Pollard & Bijker, 2021). Las vacunas de subunidades, como la de la hepatitis B, se fijan en fragmentos purificados del patógeno con el objetivo de inducir inmunidad (Vetter et al., 2018).

No obstante, estas técnicas enfrentan limitaciones significativas. El cultivo de patógenos requiere de unas condiciones controladas y para esto son necesarias instalaciones específicas, lo que aumenta los costos y tiempos de producción (Kennedy et al., 2020). Por otro lado, la variabilidad genética presente en algunos microorganismos y la dificultad para su cultivo in vitro han restringido su aplicación a patógenos más complejos o de evolución rápida, como el VIH o la influenza (Kennedy et al., 2020). Estos métodos asentaron las bases de la inmunización moderna pero su incapacidad para responder a nuevas amenazas de una manera ágil y ligera ha impulsado la adopción de nuevos enfoques tecnológicos avanzados en la última década (Pollard & Bijker, 2021).

2.2.2. Cambio a tecnologías modernas: del ADN recombinante a la vacunología inversa

El desarrollo del ADN recombinante marcó un hito en la vacunología al permitir la producción de antígenos específicos sin la necesidad de cultivar el patógeno completo, un gran avance que se consolidó con vacunas como la del virus del papiloma humano (VPH) como ejemplo, vacuna que fue ampliamente implementada en la última década para la prevención del cáncer cervical (Kennedy et al., 2020). Este enfoque continuó su desarrollo hasta una notoria evolución en el año 2010 con la integración de herramientas informáticas, dándose lugar a la vacunología inversa. La vacunología inversa utiliza para la identificación de antígenos candidatos la secuenciación genómica de manera computacional, eliminando así el hecho de depender de cultivos tradicionales. Este método fue clave en el desarrollo de vacunas como la del meningococo B (Bexsero), cuya distribución se optimizó durante la década de 2010 a 2020, demostrando de manera satisfactoria cómo la bioinformática puede acelerar significativamente los tiempos de desarrollo

(Bernasconi et al., 2020). Este cambio ha asentado las bases para más plataformas innovadoras que han dominado la vacunología reciente (Pollard & Bijker, 2021).

2.2.3. Plataformas innovadoras: ARNm, vectores virales y vacunología estructural

Las plataformas tecnológicas más destacadas han sido las vacunas de ARN mensajero (ARNm), los vectores virales y a vacunología estructural.

Por una parte, se encuentran las vacunas de ARNm, como las desarrolladas por Pfizer-BioNTech y Moderna contra el COVID-19 en 2020. Estas introducen secuencias genéticas sintéticas que instruyen a las células humanas a producir proteínas virales, como la espícula del SARS-CoV-2, la cual desencadena una respuesta inmune. Esta plataforma fue investigada desde finales del siglo XX, alcanzando su madurez en la última década gracias a avances en la estabilización del ARN y sistemas de entrega en nanopartículas lipídicas (Pardi et al., 2020; Pollard & Bijker, 2021). La figura 1 muestra las innovaciones recientes de esta tecnología.

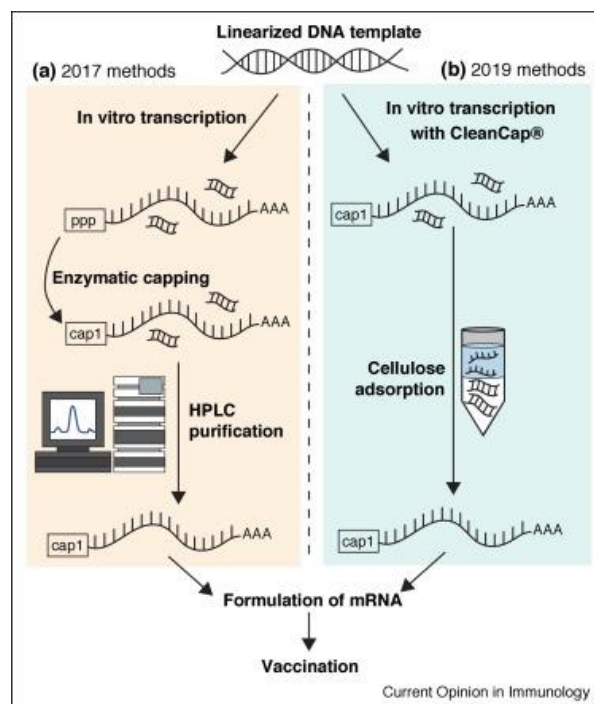


Figura 1. Innovaciones recientes en la plataforma de ARN mensajero.

Nota. Este esquema compara los métodos utilizados en el año 2017 para la preparación de ARN mensajero no inflamatorio (a), frente a los métodos simplificados disponibles en 2019 (b) gracias a los avances en estas técnicas. Estos avances fueron importantes para facilitar el desarrollo de vacunas

de ARN mensajero como las de Pfizer- BioNTech y Moderna contra el COVID-19. Adaptado de Pardi et al. (2020).

Por otro lado, existen los vectores virales, los cuáles utilizan virus no patógenos, como adenovirus, para transportar los genes del patógeno objetivo al organismo diana. Estas plataformas combinan seguridad con una respuesta inmune de gran fuerza, amplificándose su aplicabilidad.

Por último, la vacunología estructural emplea técnicas como la microscopía crioelectrónica para la realización de diseños de antígenos con estructuras tridimensionales optimizadas, produciendo una mejoría en su inmunogenicidad. Este enfoque ha sido clave en el desarrollo de vacunas contra el virus respiratorio sincitial (VRS), como Abrysvo, aprobada en 2023 tras investigaciones que aprovecharon el diseño de proteínas prefusión para la maximización de la protección (Anasir et al., 2019). Dichas tecnologías han revolucionado la capacidad de la vacunología para enfrentar patógenos con una gran complejidad.

2.2.4. Impacto y perspectivas en la última década

Los avances en tecnología entre 2015 y 2025 han permitido respuestas rápidas y efectivas a pandemias como la del COVID-19 y han conseguido impulsar el desarrollo de vacunas contra enfermedades complejas como la malaria o el VIH (Pollard & Bijker, 2021). Las plataformas innovadoras nombradas han reducido los tiempos de respuesta y desarrollo de años a meses y han abierto la posibilidad de vacunas universales, como las diseñadas contra múltiples cepas de la influenza, un objetivo cada vez más viable gracias a la aportación y flexibilidad de estas tecnologías (Yue et al., 2023). Sin embargo, desafíos como la escalabilidad de la producción y la aceptación pública continúan persistiendo, lo que demanda un análisis más profundo en el contexto de la salud global.

2.3. Enfermedades emergentes y reemergentes: un actual desafío para la vacunología

Las enfermedades emergentes y reemergentes presentan un reto crucial para las vacunas, logrando un impulso en innovaciones tecnológicas y demandando unas respuestas globales más coordinadas (Excler et al., 2021). Primero se debe de entender las diferencias entre una enfermedad emergente y una reemergente. El término de una enfermedad emergente se refiere a aquella enfermedad causada por un patógeno recientemente descubierto o identificado en caso de que afecten a nuevas poblaciones. Por otro lado, en el caso de las enfermedades reemergentes son aquellas previamente controladas pero resurgidas por diversos factores como pueden ser la baja cobertura vacunal o la evolución del mismo patógeno, estas últimas han conseguido transformar el panorama de la salud pública (Rebollo García et al., 2021).

La globalización ha facilitado la rápida diseminación de patógenos a través de los numerosos viajes internacionales, mientras que el cambio climático ha alterado los ecosistemas expandiendo el rango de vectores como mosquitos, ya que estos se ven obligados a migrar por los cambios en su hábitat natural (Van de Vuurst & Escobar, 2023). Además, la resistencia antimicrobiana ha aumentado la complejidad del tratamiento de infecciones, aumentando la dependencia de las vacunas como la herramienta preventiva primaria (Wouters et al., 2021). Estos factores exigen avances claros en el desarrollo, producción y distribución igualitaria de vacunas para mitigar su impacto.

El ejemplo más sobresaliente es el SARS-CoV-2, el cual desencadenó la pandemia de COVID-19. Este virus zoonótico, probablemente originado en murciélagos y transmitidos a humanos a través de un huésped intermediario, se propagó rápidamente debido a la conectividad global, exponiendo las limitaciones de los métodos tradicionales y aumentando el uso de plataformas como el ARN mensajero (ARNm) (Excler et al., 2021). En la figura 2, se puede observar claramente la propagación del COVID-19 junto al ébola.

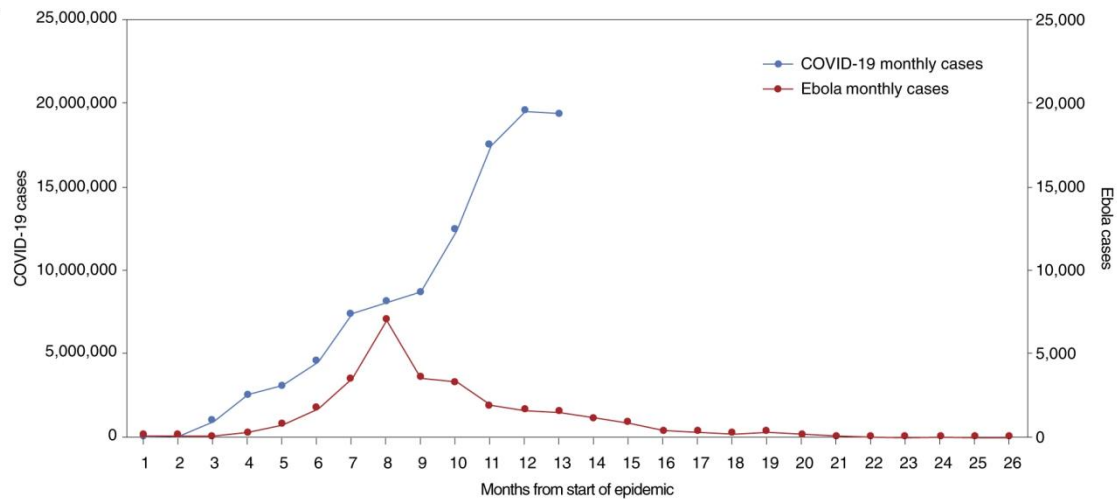


Figura 2. Curvas epidémicas de COVID-19 y ébola desde sus inicios.

Nota. En esta figura se observan los casos a través de los meses de estas enfermedades emergentes, mostrando un pico de más de 20 millones de casos de COVID en el primer año y más de 5 millones de casos de ébola en el octavo mes. Esta figura resalta la magnitud de estas enfermedades y el desafío para el desarrollo de vacunas. Adaptada por Excler et al. (2021).

Las vacunas de ARNm se desarrollaron en menos de un año gracias a nuevos estudios y avances en la estabilización del ARN y en sistemas de entrega basados en nanopartículas lipídicas (Pardi et al., 2020).

Este hito no solo mostró la capacidad de respuesta ante una crisis sanitaria, sino que además consiguió abrir nuevas posibilidades para enfrentar patógenos emergentes que puedan aparecer en un futuro con tecnologías adaptables y de rápida implementación como arma frente a estos (Pardi et al., 2020).

En cuanto a las enfermedades reemergentes como el sarampión y la tos ferina, han resurgido en lugares donde las tasas de vacunación han disminuido, dejando en evidencia la fragilidad de los logros históricos de la vacunación. El sarampión fue declarado eliminado en varias áreas a inicios del siglo XXI (Organización Panamericana de la Salud., 2023), reapareció debido a la duda en la vacunación, aumentada por desinformación, y a la interrupción de campañas de vacunación debido al parón provocado por la pandemia de COVID-19 (Patel et al., 2020). La tosferina, causada por *Bordetella pertussis*, también ha mostrado un aumento en su incidencia tanto en niños como en adultos, siendo el primer grupo el más afectado, este hecho ha desafiado a las estrategias vacunales existentes debido a la evolución de esta bacteria y la disminución de la inmunidad con el tiempo (Haro Pérez et al., 2025). Estos casos resaltan la necesidad de reforzar las campañas de educación

pública para contrarrestar la desconfianza y mejorar los sistemas de inmunización (Wilson & Wiysonge, 2020). Las enfermedades del trópico emergentes, como los casos del dengue y el Zika, han aumentado su alcance geográfico debido al cambio climático y la urbanización desmesurada, que han provocado la proliferación de vectores como el mosquito *Aedes aegypti* (Van de Vuurst & Escobar, 2023). El dengue, que afecta a millones de personas por año, ha impulsado esfuerzos para el desarrollo de vacunas efectivas, aunque las soluciones actuales se enfrentan a limitaciones ya que este virus presenta cuatro serotipos de una elevada complejidad (Wilder-Smith, 2022). Además, el virus del Zika, el cual ha sido relacionado con defectos congénitos como la microcefalia, ha puesto de manifiesto la necesidad de unas urgentes respuestas vacunales adaptada a estas enfermedades emergentes. Por otro lado, no debe pasar desapercibido el virus del Ébola, responsable de brotes mortales en África Occidental y Central (Henao-Restrepo et al., 2017). Estos casos muestran cómo las respuestas vacunales deben adaptarse a las características específicas de cada patógeno y a la situación epidemiológica cambiante.

Estos ejemplos reflejan la necesidad de integrar avances en tecnología con un entendimiento más profundo de las dinámicas evolutivas de los patógenos y las respuestas inmunitarias del ser humano. La pandemia del COVID-19 marcó un gran punto de inflexión al demostrar que las plataformas vacunales modernas pueden responder rápidamente a crisis globales, pero además resaltó las limitaciones en la distribución y aceptación por parte de la sociedad de dichas soluciones. *“Los esfuerzos mundiales de inmunización han salvado aproximadamente 154 millones de vidas en los últimos 50 años”* (Organización Mundial de la Salud, 2024), pero el panorama cambiante de las enfermedades infecciosas requiere una vigilancia constante y una inversión sostenible en investigación y desarrollo. Además, tanto enfermedades emergentes como reemergentes plantean retos logísticos, sociales y éticos que trascienden la ciencia pura.

3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Objetivo general: Analizar los principales avances tecnológicos en el desarrollo de vacunas de la última década

Objetivos específicos:

1. Identificar y describir los avances en las plataformas tecnológicas utilizadas para la creación de nuevas vacunas.
2. Revisar los avances en el desarrollo de vacunas contra enfermedades emergentes y reemergentes.
3. Examinar los desafíos éticos, sociales y económicos asociados al desarrollo y distribución de vacunas en la última década.

4. METODOLOGÍA

El presente trabajo se basa en una revisión bibliográfica sistemática cuyo objetivo es analizar los avances en el desarrollo y aplicación de vacunas durante la última década (2015-2025). Este enfoque permite recopilar, evaluar y sintetizar la evidencia científica disponible en fuentes secundarias, como artículos científicos, los cuales sirven para responder a los objetivos de estudio. A continuación, se detalla el diseño de la investigación, las fuentes utilizadas para la obtención de información, el procedimiento de esta recolección y selección y el método de análisis.

4.1. Diseño de la investigación

En este trabajo se analizan los diferentes progresos en el campo de las vacunas. Este método es el indicado para proporcionar una visión amplia, conectando el avance de la ciencia junto con el de la sociedad y con el desarrollo tecnológico relacionado con el diseño, la creación, distribución y efectividad de las vacunas. El estudio cubre la última década, buscando resaltar las innovaciones más destacadas que han mejorado este campo.

4.2. Fuentes de información

Las fuentes de información de fueron exclusivamente secundarias, como son artículos científicos y publicaciones en revistas académicas, se les dio prioridad a los artículos que presentan un acceso libre. La búsqueda de la literatura se realizó en cuatro bases de datos clave:

- **Pubmed**
- **Google Scholar**
- **Scopus**
- **Web of Science**

Además, se consultaron informes de organismos internacionales, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), para ofrecer un mejor entendimiento sobre los avances en la política y las aplicaciones prácticas de las vacunas.

4.3. Criterios de selección de fuentes

Para garantizar la mejor calidad y relevancia de la información, se establecieron los siguientes criterios de inclusión y de exclusión:

- **Criterios de inclusión:**

- Artículos publicados entre 2015 y 2025, con una preferencia por los artículos de los últimos cinco años debido a la pandemia del COVID-19.
- Publicaciones en inglés o español, debido a su accesibilidad y predominancia en la literatura científica.
- Artículos que aborden avances en el desarrollo, eficacia, tecnología, eficacia, distribución o impacto social de las vacunas.
- Fuentes revisadas por pares o provenientes de organismos internacionales reconocidos.

- **Criterios de exclusión:**

- Publicaciones anteriores al 2015.
- Artículos no relacionados con vacunas.
- Fuentes no académicas como blogs.
- Publicaciones en idiomas distintos al inglés o español.

4.4. Procedimiento de recolección de datos

El proceso de búsqueda y selección se llevó a cabo de la siguiente forma:

- **Búsqueda inicial:** Se realizaron diversas búsquedas en las fuentes de datos anteriormente mencionadas utilizando palabras clave como “vaccines”, “vaccine development”, “vaccine technology”, “inmunitation advances”, “mRNA vaccines”, “vaccine efficacy”, y sus equivalentes en español (por ejemplo, para “vaccine”, se realizó la búsqueda de “vacuna”). Además para refinar los resultados se utilizaron operadores booleanos (AND, OR, NOT) para refinar los resultados.
- **Selección preliminar:** Se revisaron los títulos y resúmenes de los artículos resultantes para evaluar su relevancia según los criterios.
- **Selección final:** Los artículos que cumplían los criterios fueron leídos con detalle y los que aportaban una información significativa fueron escogidos.

Se recopilaron un total de 41 artículos, los cuales constituyen la base de la revisión.

4.5. Análisis de datos

El análisis de la información se realizó mediante un enfoque temático y cualitativo. Los artículos que fueron seleccionados fueron revisados para identificar temas clave relacionados con los objetivos del estudio, como:

- Innovaciones tecnológicas.
- Mejoras en eficacia y seguridad de las vacunas.
- Avances en la producción y distribución global.
- Impacto social y desafíos éticos en la vacunación.

Para garantizar la coherencia, los datos se compararon para destacar tendencias, consensos y discrepancias.

4.6. Limitaciones metodológicas

La revisión bibliográfica presenta algunas limitaciones:

- La dependencia de fuentes secundarias implica que los resultados están sujetos a la calidad de la literatura ya existente.
- La exclusión de artículos en otros idiomas puede haber omitido contribuciones relevantes.
- El rápido cambio en el campo de las vacunas puede provocar que algunos de los avances recientes aún no estén completamente documentados en la literatura académica.

5. RESULTADOS

5.1. Avances en tecnológicos para el desarrollo de vacunas

Durante los últimos diez años (2015-2025), la vacunología ha experimentado un notorio cambio gracias al desarrollo de plataformas tecnológicas avanzadas que han optimizado la velocidad, precisión y flexibilidad de la producción de vacunas (Pollard & Bijker, 2021). Entre los avances que más se pueden destacar están las plataformas innovadoras como las vacunas de ARN mensajero, los vectores virales y la vacunología estructural, que han dejado atrás muchos de los problemas de los métodos clásicos, permitiendo respuestas más rápidas y efectivas frente a crisis sanitarias globales (Bernasconi et al., 2020). En este apartado se estudia el impacto de las tecnologías mencionadas, los usos de estas en la práctica y su comparación con los enfoques tradicionales, donde se destacan los éxitos, los retos pendientes y las oportunidades para continuar mejorando.

5.2. Vacunas de ARNm: novedades y sus aplicaciones

Las vacunas de ARN mensajero (ARNm) han conseguido ser una de las novedades más revolucionarias de la vacunología actual, donde destaca su rápido desarrollo y su alta eficacia (Pardi et al., 2020). En estas vacunas se da el uso de secuencias genéticas sintéticas que inducen a las células humanas a producir proteínas virales, como es el caso de la espícula del SARS-CoV-2, lo que provoca una respuesta inmune en cadena con una fuerte intensidad sin la necesidad de trabajar con el patógeno vivo directamente (Excler et al., 2021).

Los avances en la estabilización del ARN mensajero y el uso de nanopartículas lipídicas para su entrega han sido de vital importancia para remontar problemas previos, como la fragilidad del ARN y la capacidad para generar inmunidad (Pardi et al., 2020). El caso más notorio ha sido el de las vacunas contra el COVID-19 de Pfizer-BioNTech y Moderna, las cuales fueron aprobadas en el año 2020 y consiguieron marcar un hito histórico en este campo. La eficacia de estas vacunas llegó a alcanzar el 90% en cuanto a su eficacia en los ensayos clínicos, logrando una clara disminución en la morbilidad y mortalidad del patógeno durante la pandemia (Polack et al., 2020). Asimismo, la plataforma ARN mensajero presenta

una alta flexibilidad ya que permite modificar rápidamente las secuencias genéticas para combatir nuevas variantes virales, un aspecto crítico y positivo frente a patógenos con un alta tasa de mutación y evolución como en el caso del SARS-CoV-2 (Yue et al., 2023). Más allá del COVID-19, las vacunas de ARN mensajero están siendo investigadas para otras enfermedades, como el virus respiratorio sincitial (VRS), del cuyas investigaciones se obtuvieron unos ensayos clínicos prometedores que sugieren un futuro amplio para esta tecnología (Feldman et al., 2019).

5.2.1. Vectores virales y vacunología estructural

Los vectores virales y la vacunología estructural han consolidado su importancia como plataformas complementarias a las vacunas de ARN mensajero anteriormente nombradas, proporcionando soluciones diversas para patógenos complejos y crisis sanitarias (Bernasconi et al., 2020). La forma en la que actúan los vectores virales es a través del uso de virus no patogénicos, como el caso de los adenovirus, para introducir genes del patógeno objetivo, generando así una respuesta inmune que combina componentes celulares y humorales (Vetter et al., 2018). Un ejemplo a destacar es la vacuna de AstraZeneca-Oxford contra el COVID-19, la cual fue basada en un adenovirus de chimpancé, que demostró una eficacia del 70-80% y fue utilizada ampliamente en países de ingresos medio- bajos debido a su facilidad de almacenamiento, seguridad y transporte (Voysey et al., 2021). Otro caso notable es la vacuna contra el ébola (Ervebo), aprobada en 2019, la cual utiliza un vector de virus de estomatitis vesicular recombinante (rVSV). Ensayos clínicos realizados en 2015 demostraron una eficacia cercana al 100% en la prevención de la enfermedad causada por el virus del Ébola (Henao-Restrepo et al., 2017), lo que llevó a su aprobación por la FDA en diciembre del 2019. Esta vacuna ha sido clave en el control de brotes en África (Choi et al., 2021).

Relacionado a la vacunología estructural, esta emplea técnicas avanzadas, como la microscopía crioelectrónica, para conseguir un diseño de antígenos con estructura tridimensional, la cual se encuentra optimizada para conseguir la máxima inmunogenicidad (Anasir & Poh, 2019). Un hito a destacar es la vacuna frente al VRS (Abrysvo), aprobada en el 2023, que aprovecha proteínas en conformación de prefusión para producir una respuesta inmune más precisa y más contundente

(Hammit et al., 2022). Esta tecnología también ha motivado el desarrollo de vacunas experimentales contra otros patógenos como la malaria y el VIH, ya que se han superado obstáculos anteriores relacionados con la gran variabilidad antigénica de estos agentes infecciosos (Kennedy et al., 2020).

5.2.2. Métodos tradicionales frente a plataformas modernas: ventajas y retos

Como se ha mencionado anteriormente, las estrategias que se usaban anteriormente para la creación de vacunas, en las que se usaban microorganismos atenuados, inactivados o subunidades antigénicas, han conseguido frenar y controlar enfermedades como el sarampión y la polio (Vetter et al., 2018). No obstante, estas técnicas presentan serias limitaciones ya que se necesitan procesos muy largos para su desarrollo y este es de alto coste, además, presentan dificultades para combatir patógenos que mutan rápido, como el caso de la influenza o el VIH (Kennedy et al., 2020). Por ejemplo, se requieren de instalaciones especializadas para el cultivo de patógenos, lo que aumenta el coste y retrasa la producción (Pollard & Bijker, 2021).

Por otro parte, las plataformas modernas, como son las vacunas de ARN mensajero y los vectores virales, han conseguido mejorar la situación, ya que han conseguido acortar los tiempos de desarrollo de años a meses, como se observó en la pandemia de COVID-19 (Excler et al., 2021). La vacunología estructural, aunque más sofisticada, ofrece una precisión increíble para diseñar antígenos (Anasir & Poh, 2019). Aún así, estas tecnologías no son perfectas, presentan diversos problemas. Las vacunas de ARN mensajero necesitan bajas temperaturas para su almacenamiento, lo que hace muy difícil su distribución en zonas con poca infraestructura (Wouters et al., 2021). En cuanto a los vectores virales, estos pueden perder eficacia si ya ha existido una inmunidad previa al vector en las personas (Bernasconi et al., 2020). Además, la vacunología estructural necesita recursos avanzados en sistemas computacionales y técnicos, lo que complica su aplicación a gran escala. Aún con la presencia de estos desafíos, estas plataformas siguen siendo prometedoras presentando un gran potencial, allanando el camino para nuevas vacunas de impacto mundial y de respuestas rápidas ante posibles futuras pandemias.

5.3. Desarrollo de vacunas contra enfermedades emergentes y reemergentes

En el periodo de los últimos diez años se ha visto un aumento en enfermedades infecciosas emergentes y reemergentes, impulsado por la globalización, el cambio climático y la disminución de la cobertura vacunal en algunas situaciones (Van de Vuurst & Escobar, 2023). Los avances en el desarrollo de vacunas han sido claves para el decrecimiento del impacto de estos patógenos, consiguiéndose logros significativos como la reducción de la morbilidad y la mortalidad y la expansión de la cobertura (Excler et al., 2021). Este apartado analiza los avances en el desarrollo de vacunas para enfermedades emergentes (SARS-CoV-2, ébola y Zika) y reemergentes (dengue, tuberculosis), mencionando los resultados logrados y los desafíos que se presentan en el diseño y en la posterior implantación de estas soluciones.

5.3.1. Vacunas para enfermedades emergentes: SARS-CoV-2, ébola y zika

Las enfermedades emergentes, caracterizadas por patógenos identificados recientemente, han requerido respuestas rápidas en el desarrollo vacunal (Rebollo García et al., 2021). La pandemia de COVID-19, causada por el SARS-CoV-2, impulsó un esfuerzo global sin precedentes, dando lugar a la aprobación de múltiples vacunas en 2020. Las vacunas de ARN mensajero, como las de Pfizer-BioNTech y Moderna, redujeron los casos graves y minimizaron las hospitalizaciones en un 70-90% en poblaciones vacunadas, según datos epidemiológicos de 2021 (Dagan et al., 2021). Asimismo, las actualizaciones de estas vacunas para las variantes como Ómicron, implementadas entre el 2022 y el 2024, han seguido siendo eficaces resistiendo la evolución viral, demostrando la adaptabilidad del desarrollo vacunal (Yue et al., 2023).

La vacuna frente al ébola (Ervebo) representa otro hito. Tras su aprobación (Henao-Restrepo et al., 2017), Ervebo ha sido implementada en campañas de vacunación en anillo en la República Democrática del Congo, reduciendo la incidencia de brotes en un 80% en el intervalo de 2019 a 2023 (Choi et al., 2021). En el caso del virus Zika, los brotes de 2015-2016 estimularon el desarrollo de candidatos vacunales, con ensayos de fase I/II mostrando respuestas inmunes prometedoras en el 90% de los individuos participantes para vacunas de ADN y ARN mensajero hasta 2023

(Poland et al., 2018). Aunque ninguna vacuna contra Zika está aprobada hasta 2025, estos avances han sentado las bases para respuestas más eficientes y rápidas frente a futuros arbovirus.

5.3.2. Avances en vacunas para enfermedades reemergentes: dengue y tuberculosis

Las enfermedades reemergentes, resurgidas por factores como la baja cobertura vacunal o la evolución de los patógenos causantes, han motivado esfuerzos para mejorar las vacunas existentes (Rebollo García et al., 2021). El dengue, transmitido por *Aedes aegypti*, ha visto un incremento en la incidencia debido al cambio climático (Van de Vuurst & Escobar, 2023). La vacuna Dengvaxia, aprobada en el año 2015, presentó limitaciones al aumentar el riesgo de dengue grave en personas seronegativas, lo que restringió su uso (Wilder-Smith, 2022). En contraste, la vacuna TAK-003, aprobada en 2022, demostró una eficacia del 80% en ensayos clínicos contra casos sintomáticos, con su mayor cobertura en niños y en adulto, según datos publicados en 2019 (Biswal et al., 2019). En la figura 3, se puede observar en un gráfico el resultado de esta vacuna frente al dengue.

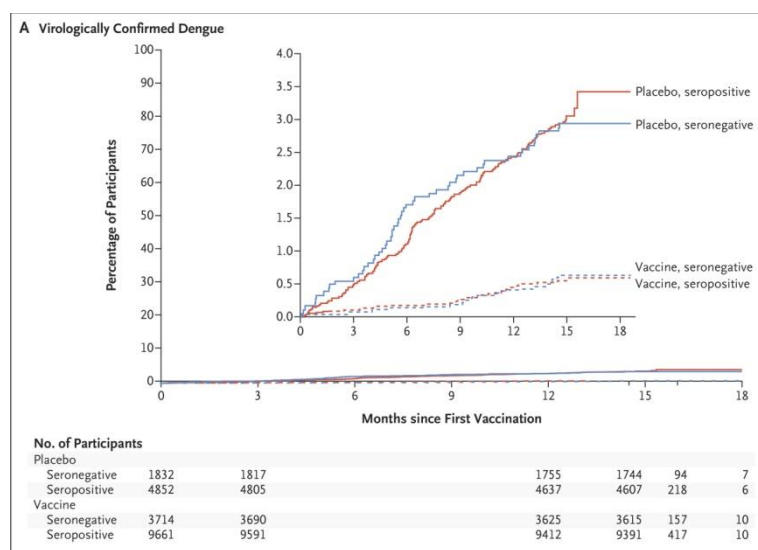


Figura 3. Datos sobre el efecto de la TAK-003 frente a incidencia acumulada de dengue.

Nota. Este gráfico muestra la incidencia acumulada de dengue en los grupos de personas vacunadas y placebo, dividida en grupos seropositivos y seronegativos, evidenciando la eficacia del 80% de TAK-003 sobre los vacunados respecto a los sintomáticos. Adaptado de Biswal et al. (2019).

Por otra parte, su aplicación en regiones endémicas al patógeno han reducido en un 60% las hospitalizaciones causadas por el dengue, principalmente en países como Indonesia y Brasil hasta el 2024 (Rivera et al., 2022).

Por otra parte, la tuberculosis (TB), causada por la bacteria *Mycobacterium tuberculosis*, sigue siendo un reto en contextos de alta prevalencia y coinfección con VIH. La vacuna BCG ofrece una protección limitada en adultos, lo que ha impulsado a la investigación y desarrollo de nuevos candidatos (Summer et al., 2025). Uno de ellos, el candidato M72/AS01E, llegó a alcanzar una eficacia del 50% en la prevención de la tuberculosis pulmonar en ensayos de fase IIb, un avance significativo para poblaciones en riesgo (Tait et al., 2019). Los estudios más recientes sugieren que nuevas vacunas podrían reducir la incidencia de la tuberculosis en un 20-30% en personas con VIH en el sur de África para 2030, reforzando los programas de control (Sumner et al., 2025). Estos avances reflejan el impacto de enfoques innovadores en enfermedades reemergentes.

5.3.3. *Desafíos en el desarrollo de vacunas para patógenos variables*

El desarrollo de vacunas para patógenos con alta variabilidad genética plantea obstáculos significativos (Kennedy et al., 2020). Para el SARS-CoV-2, la aparición de variantes ha necesitado reformulaciones anuales de las vacunas, lo que provoca un aumento de los costos y dificulta la distribución en países de bajos ingresos (Yue et al., 2023). En el caso del dengue, la presencia de cuatro serotipos dificulta el diseño de vacunas que eviten el fenómeno de potenciación dependiente de anticuerpos, una amenaza que ha limitado la confianza en soluciones como Dengvaxia (Wilder-Smith, 2022).

En la tuberculosis, la complejidad del patógeno intracelular requiere de vacunas que induzcan inmunidad celular de larga duración, un objetivo aún no alcanzado a su plenitud (Sumner et al., 2025). El desarrollo de vacunas contra el virus del Zika enfrenta obstáculos debido a la necesidad de garantizar una mayor seguridad en mujeres en gestación, lo que ha limitado el avance en los ensayos clínicos, con solo un 10% de candidatos avanzando a fase III (Poland et al., 2018). Superar estas barreras requiere la integración de tecnologías como la vacunología estructural para la optimización de antígenos, junto con colaboraciones internacionales que agilicen los procesos y la evaluación de las vacunas (Anasir & Poh, 2019).

5.4. Desafíos éticos, sociales y económicos en el desarrollo y distribución de vacunas

El desarrollo y la distribución de las vacunas en la última década han enfrentado obstáculos éticos, sociales y económicos que han restringido su alcance global, a pesar de los avances tecnológicos y científicos (Wouters et al., 2021). Problemas como la desigualdad en el acceso, el rechazo social a la vacunación por desinformación y limitaciones financieras han subrayado la necesidad de incorporar en las políticas de salud pública perspectivas sociales y económicas (Wilson & Wiysonge, 2020). Este apartado analiza tres desafíos clave: la inequidad en el acceso y la priorización, la hesitación vacunal alimentada por la desinformación, y las restricciones económicas vinculadas a la financiación en investigación, producción y escalabilidad de las vacunas.

5.4.1. Inequidad y priorización en el acceso a vacunas

La distribución desigual de las vacunas ha representado un problema ético constante, que se intensificó durante la pandemia de COVID-19 (Wouters et al., 2021). En 2021, los países de altos ingresos y recursos alcanzaron tasas de vacunación superiores al 70%, mientras que en naciones que presentaban ingresos menores, menos del 10% de la población se encontraba vacunada, según estadísticas de la OMS (Mathieu et al., 2021). En la figura 4 se puede apreciar la desigualdad en la administración de las vacunas alrededor del mundo.

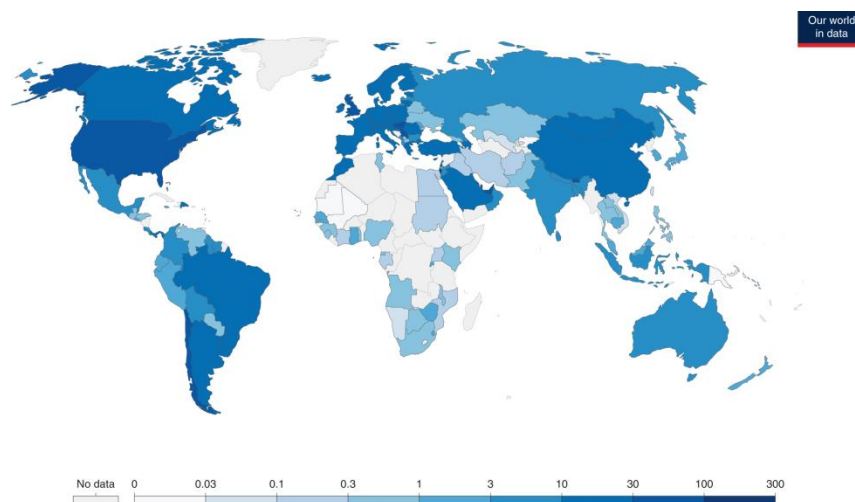


Figura 4. Dosis administradas de vacunas contra el COVID-19 por cada 100 personas desde el inicio de la pandemia hasta el 21 de abril de 2021.

Nota. Gráfico que muestra las tasas de vacunación en cada país, dejando en evidencia las desigualdades entre países de altos y bajos ingresos durante el reparto global de las vacunas. Adaptado de Mathieu et al. (2021).

Esta disparidad, conocida como “nacionalismo vacunal”, se vio agravada por el acúmulo de dosis por parte de países ricos y la falta de mecanismos efectivos para redistribuir excedentes (Jamrozik & Selgelid, 2020). Iniciativas como COVAX, diseñadas para asegurar un acceso igualitario, distribuyeron más de mil millones de dosis a países de bajos ingresos hasta 2023, pero enfrentaron complicaciones y retrasos debido a limitaciones financieras y logísticas, reflejando un modelo de financiación insuficiente para poder abordar con eficiencia la inequidad global (Stein, 2021).

La prioridad hacia poblaciones vulnerables también ha provocado dilemas éticos. Durante los brotes de ébola en África en los periodos de 2014-2016 y 2018-2020, el destino de las primeras vacunas fue principalmente a trabajadores sanitarios y contactos cercanos, dejando a las comunidades rurales con un más difícil acceso (Jamrozik & Selgelid, 2020). Estas decisiones, aunque fueron influenciadas por la urgencia, provocaron sentimientos de exclusión en las personas que no recibieron el mismo trato y dejaron dudas sobre cómo se podría encontrar el balance perfecto entre eficacia y una distribución equitativa y justa (Wilson & Wyisonge, 2020). La diferencia en el acceso a las vacunas resalta la necesidad de marcar y establecer unos principios éticos globales que prioricen a las poblaciones más vulnerables y necesitadas y refuercen los sistemas de salud en regiones poco favorecidas (Mathieu et al., 2021).

5.4.2. Hesitación vacunal y el poder de la desinformación

La reticencia a la vacunación, la cual está definida como el rechazo a vacunarse pese a su disponibilidad, se ha transformado en un desafío actual social de peso (Wilson & Wyisonge, 2020). La desinformación, agravada por las redes sociales, ha dificultado la confianza en las vacunas, especialmente durante la pandemia de COVID-19. En el año 2020, encuestas realizadas alrededor del mundo, revelaron que hasta un 25% de la población de países como Estados Unidos dudaba de la seguridad que presentaban las vacunas, estas dudas se encontraban influenciadas por bulos sobre efectos secundarios y cuestionamientos sobre los procesos en el

desarrollo (Harrison & Wu, 2020). Estas actitudes han frenado las tasas de vacunación, alargando el problema relacionado a enfermedades que podrían haberse prevenido con más antelación (Pollard & Bijker, 2021).

La duda sobre si las vacunas son fiables o no han afectado a la confianza pública, dando lugar al regreso de enfermedades ya prevenibles en varias regiones (Larson et al., 2015). En la figura 5, se observa la aceptación de la vacuna contra el COVID-19 en diferentes países, notándose el efecto de la hesitación vacunal.

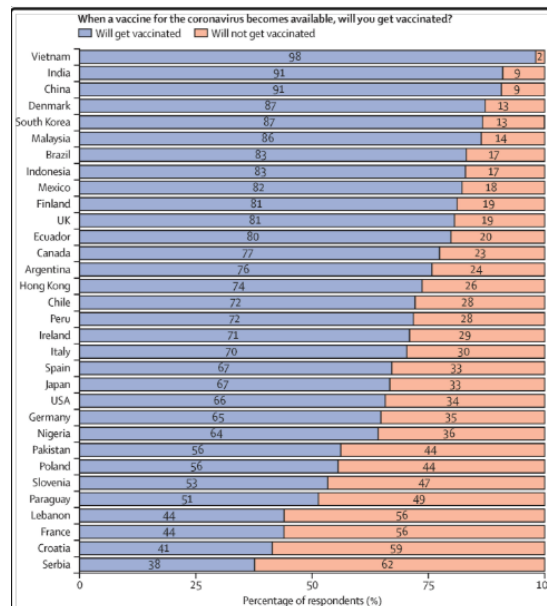


Figura 5. La aceptación de la vacuna contra el COVID-19 en 32 países en el año 2020.

Nota. Este gráfico representa el porcentaje de encuestados que afirmaron que se vacunarían seguro o muy probablemente en el caso de poder hacerlo. Esta encuesta fue realizada entre octubre y diciembre del año 2020. Los datos reflejan una alta aceptación en países como India y Vietnam (91% y 98%, respectivamente) frente a una menor aceptación en países como Croacia (41%) y Serbia (38%). Adaptado de Wouters et al.(2021).

Sin embargo, se ha dado el caso en el que campañas de comunicación bien efectuadas, es decir, aquellas que priorizan transparencia y participación de las comunidades, han mostrado ser esenciales para contrarrestar la desinformación. Por ejemplo, los programas educativos en África Occidental durante los brotes de ébola consiguieron un claro aumento de la aceptación de la vacuna Ervebo en torno a un 25% entre el 2019 y 2021 (Vinck et al., 2019).

Aún con todo esto, la resistencia a la vacunación sigue siendo un actual reto que demanda continuos esfuerzos para generar confianza en la población y para promover la educación (Wilson & Wyisonge, 2020).

5.4.3. Financiación, producción y escalabilidad: barreras económicas

Una economía limitada ha sido una de las principales causas del retraso tanto en el desarrollo de las vacunas como en su distribución, dándose sobre todo en lugares con escasos recursos (Wouters et al., 2021). El elevado costo de crear vacunas modernas, que exige inversiones de miles de millones de euros, ha restringido su producción a unas pocas empresas en países desarrollados (Forman et al., 2021). Durante la pandemia de COVID-19, la dependencia de pocas empresas en el desarrollo y distribución de las vacunas generó el efecto de cuello de botella en la cadena de suministro, lo que provocó un previsible retraso en el envío de dosis a los países de bajos ingresos (Bown & Bollyky, 2022).

El hecho de escalar la producción de vacunas ha sido todo un reto. Las vacunas que necesitan de un almacenamiento a bajas temperaturas complican la distribución en zonas con infraestructura limitada (Wouters et al., 2021). En cambio, vacunas como TAK-003 para el dengue, que son más estables a temperatura ambiente, han tenido menos problemas logísticos, aunque su producción todavía no cubre la demanda mundial (Rivera et al., 2022). La financiación pública y los acuerdos entre sectores del sector público y privado han sido clave para sortear estos obstáculos. Por ejemplo, los fondos de la Coalición para las Innovaciones en Preparación para Epidemias (CEPI) aceleraron el desarrollo de vacunas contra el Zika y el ébola, pero el dinero sigue sin ser suficiente para abordar eficazmente todas las enfermedades prioritarias (Gouglas et al., 2018). Estos problemas económicos subrayan la necesidad de nuevos enfoques de financiación y de impulsar la capacidad de producción local en países en desarrollo (Forman et al., 2021).

6. DISCUSIÓN

En la presente revisión bibliográfica se han explorado los principales avances tecnológicos en el desarrollo de vacunas a lo largo de los últimos diez años (2015-2025), poniendo el foco en cómo la ciencia ha respondido a enfermedades emergentes y reemergentes, además de los dilemas éticos, sociales y económicos que surgen en el proceso. Los resultados indican que ha habido un gran salto en la vacunología gracias a tecnologías como el ARN mensajero, los vectores virales o la vacunología estructural, tecnologías que han conseguido quebrar las barreras que presentaban los métodos tradicionales y que no eran capaces de superar. No obstante, aún existen importantes desafíos, como la desigualdad en el acceso, la negación a vacunarse y las complicaciones en cuanto a los costes económicos, los cuales reducen el alcance global de estos procesos. En los siguientes apartados, se presenta un análisis crítico de los descubrimientos, realizándose comparación con la literatura actual y destacando sus implicaciones, limitaciones y las oportunidades para el futuro.

6.1. Avances tecnológicos: un cambio en la vacunología

El estudio de los datos indica que las plataformas de ARN mensajero, los vectores virales y la vacunología estructural han supuesto una revolución en el desarrollo de vacunas, reduciendo de manera efectiva los tiempos en el diseño y en la producción. Como ejemplo más destacable se encuentran las vacunas de ARN mensajero de Pfizer-BioNTech y Moderna contra el SARS-CoV-2, las cuales en ensayos clínicos lograron una eficacia superior al 90% (Polack et al., 2020). Este avance destaca la gran capacidad de estas tecnologías para dar una respuesta rápida frente a una crisis sanitaria global. Una de las ventajas más destacables de las plataformas de ARN mensajero es la capacidad de ajustar las secuencias genéticas con agilidad, proporcionando a esta plataforma mucha flexibilidad para combatir patógenos de rápida mutación, como el SARS-CoV-2 o la influenza (Yue et al., 2023). Si comparamos estas tecnologías frente a los métodos utilizados anteriormente, los cuales podían extenderse durante años para el desarrollo de una vacuna, estas nuevas han reducido el tiempo de años a meses, marcando un hito histórico en la vacunología.

Por otra parte, las vacunas producidas por vectores virales, como las de AstraZeneca-Oxford y Ervebo contra el ébola, se diferencian del resto por sus ventajas relacionadas al almacenamiento y a la distribución, lo que las hace realmente útiles en lugares con infraestructura limitada (Henao-Restrepo et al., 2017; Voysey et al., 2021). La vacunología estructural, representada especialmente por la vacuna Abrysvo para el virus respiratorio sincitial (VRS), ha conseguido el diseño de antígenos con una precisión nunca antes observada, abriendo caminos realmente prometedores para combatir patógenos que presentan alta complejidad como la malaria y el VIH (Hammit et al., 2022). Estos hallazgos concuerdan con la literatura científica presente, la cual subraya el potencial de estas nuevas tecnologías para asentar las bases de vacunas universales y respuestas ágiles y efectivas frente a futuras posibles pandemias (Bernasconi et al., 2020; Pollard & Bijker, 2021).

Sin embargo, todas estas novedades también presentan retos, tanto técnicos como logísticos. Las vacunas de ARN mensajero, por ejemplo, exigen almacenamientos a temperaturas extremadamente bajas, lo que retrasa su distribución en países con recursos limitados (Wouters et al., 2021).

Por otro lado, los vectores virales se ven limitados por una ya existente inmunidad en ciertas poblaciones, lo que perjudicaría su eficacia. Sumando a esto, la vacunología estructural por su parte demanda recursos computacionales avanzados, lo que puede restringir su escalabilidad (Kennedy et al., 2020). Todos estos desafíos sugieren que, aunque las recientes tecnologías son transformadoras, su implementación efectiva requiere además de mejoras en la infraestructura y accesibilidad global.

6.2. Respuesta a enfermedades emergentes y reemergentes

Los resultados muestran avances significativos en el desarrollo de vacunas contra enfermedades emergentes como el SARS-CoV-2, el ébola y el Zika, así como de enfermedades reemergentes como el dengue y la tuberculosis. La rápida aprobación de vacunas contra el SARS-CoV-2, con reducciones del 70-90% en hospitalizaciones (Dagan et al., 2021), y el control de brotes de ébola con Ervebo, con una eficacia cercana a la total (Henao-Restrepo et al., 2017), reflejan la capacidad de las plataformas modernas para mitigar crisis sanitarias. Sin embargo, el desarrollo de vacunas para el Zika, aún sin aprobación en 2025, y las limitaciones

de Dengvaxia para el dengue subrayan la dificultad de abordar patógenos con una alta variabilidad genética (Poland et al., 2018; Wilder-Smith, 2022).

Se observa que las enfermedades reemergentes, como el caso del sarampión y la tos ferina, han resurgido debido a la disminución de la cobertura vacunal, agravada por la desinformación y la interrupción de campañas durante la pandemia de COVID-19 (Haro Pérez et al., 2025; Patel et al., 2020). Esto sugiere que los avances tecnológicos, aunque son cruciales, siguen siendo insuficientes si no van acompañados de unas estrategias efectivas para mejorar la aceptación pública y la cobertura vacunal. Hay investigaciones que apuntan a que la desconfianza hacia las vacunas ha influido en que reaparezcan enfermedades que ya se podían prevenir (Wilson y Wiysonge, 2020). En el caso de la tuberculosis, la vacuna M72/AS01E se perfila como una opción prometedora, ya que en estudios clínicos de fase IIb mostró una eficacia del 50 % (Tait et al., 2019). Sin embargo, la complejidad del patógeno y la necesidad de una inmunidad celular duradera han limitado su impacto (Sumner et al., 2025). Estos resultados resaltan la importancia de integrar enfoques como la vacunología estructural y la colaboración internacional para superar las barreras biológicas y logísticas en el desarrollo de vacunas para patógenos complejos.

6.3. Desafíos éticos, sociales y económicos: barreras persistentes

Los resultados destacan que la inequidad en el acceso a las vacunas, la hesitación vacunal y las barreras económicas son obstáculos críticos que han provocado el retroceso del impacto de los avances tecnológicos. La desigualdad en la distribución durante la pandemia de COVID-19, con tasas de vacunación del 70% en países ricos frente al 10% en países pobres en 2021 (Mathieu et al., 2021), refleja un problema estructural de “nacionalismo vacunal” y de una financiación insuficiente para iniciativas como COVAX (Stein, 2021). Esto sugiere que la cooperación internacional, siendo necesaria, requiere de mecanismos más robustos para garantizar la equidad.

La hesitación vacunada por su parte, impulsada por la desinformación, ha provocado el aumento de la transmisión de enfermedades prevenibles, con un 25% de la población en algunos países expresando dudas sobre la seguridad y fiabilidad de las vacunas (Harrison & Wu, 2020). Las campañas educativas, como las implantadas durante los brotes de ébola, han mostrado éxito en aumentar la

aceptación (Vinck et al., 2019), lo que indica que estrategias basadas en la transparencia y la participación comunitaria son muy importantes para contrarrestar la desconfianza.

En el aspecto económico, los altos costos en el desarrollo y producción de las vacunas, junto con la dependencia de empresas farmacéuticas en países desarrollados, han restringido la accesibilidad y el progreso de estas (Forman et al., 2021). La escasez de materias primas y la necesidad de almacenamiento a bajas temperaturas han dificultado la distribución, especialmente para las vacunas de ARN mensajero (Wouters et al., 2021). Estos hallazgos coinciden con la literatura, que aboga por nuevos modelos de financiación que presenten una mayor capacidad de producción local en países en desarrollo (Gouglas et al., 2018).

6.4. Implicaciones y perspectivas

Los avances tecnológicos en la vacunología han transformado la capacidad de respuesta ante crisis sanitarias, pero su impacto depende ampliamente de superar los desafíos éticos, sociales y económicos. Tecnologías como el ARN mensajero y los vectores virales han abierto nuevas posibilidades en el desarrollo de vacunas, no solo para responder rápidamente a nuevas amenazas, sino también para avanzar hacia vacunas más amplias o universales. Aun así, la desigualdad en el acceso y la desconfianza hacia las vacunas muestran que no basta con los logros científicos: hacen falta políticas públicas firmes que acompañen estos avances. Para que estas innovaciones tengan un verdadero impacto, es clave invertir en educación, reforzar la cooperación internacional y mejorar la infraestructura sanitaria local.

Si se analiza con una mirada crítica, queda claro que el éxito de la vacunología no se mide solo por cuán efectivas son las vacunas, sino también por su capacidad para llegar a toda la población, especialmente a quienes más lo necesitan. La pandemia de COVID-19 demostró que, a pesar de que la ciencia puede proporcionar respuestas rápidamente, lograr que se distribuyan de manera justa sigue siendo un reto significativo. Por esa razón, se vuelve cada vez más claro que el futuro de la vacunología debe enfocarse no solo en la innovación, sino también en asegurar una distribución equitativa y fomentar la confianza en la ciudadanía.

6.5. Limitaciones y direcciones futuras

Esta revisión, al apoyarse en un enfoque bibliográfico, tiene ciertas limitaciones, como su dependencia de fuentes secundarias. Asimismo, es importante considerar que el ámbito de la vacunología está progresando rápidamente, lo que significa que ciertos avances recientes pueden no estar completamente reflejados en la bibliografía revisada. En el contexto de futuras investigaciones, resultaría interesante incorporar estudios primarios y adoptar un enfoque más amplio que integre aspectos sociales, como encuestas sobre la reticencia a la vacunación, junto con algunos análisis económicos, para obtener así una visión más integral del impacto real de estas tecnologías.

7. CONCLUSIÓN

- En los últimos diez años, la vacunología ha progresado enormemente debido a innovaciones que han transformado el escenario.
- A pesar de estos avances, persisten barreras significativas como el acceso desigual, la desconfianza social y la carencia de recursos económicos.
- Las tecnologías emergentes proporcionan una base firme para edificar un futuro más brillante.
- Para abordar estos desafíos, se requiere una colaboración internacional que sincronice esfuerzos y recursos.
- Es esencial adoptar un enfoque que integre ciencia, ética, justicia y solidaridad para progresar de manera equitativa.
- El objetivo final es evidente: conseguir que todas las personas, sin excepción alguna, tengan acceso a vacunas y, así, salvaguardar la salud a nivel global.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Anasir, M. I., & Poh, C. L. (2019). Structural Vaccinology for Viral Vaccine Design. *Frontiers in microbiology*, 10, 738. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00738>
2. Bernasconi, V., Kristiansen, P. A., Whelan, M., Román, R. G., Bettis, A., Yimer, S. A., Gurry, C., Andersen, S. R., Yeskey, D., Mandi, H., Kumar, A., Holst, J., Clark, C., Cramer, J. P., Røttingen, J. A., Hatchett, R., Saville, M., & Norheim, G. (2020). Developing vaccines against epidemic-prone emerging infectious diseases. Entwicklung von Impfstoffen gegen neu auftretende Infektionskrankheiten mit epidemischem Potenzial. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz*, 63(1), 65–73. <https://doi.org/10.1007/s00103-019-03061-2>
3. Biswal, S., Reynales, H., Saez-Llorens, X., Lopez, P., Borja-Tabora, C., Kosalaraksa, P., Sirivichayakul, C., Watanaveeradej, V., Rivera, L., Espinoza, F., Fernando, L., Dietze, R., Luz, K., Venâncio da Cunha, R., Jimeno, J., López-Medina, E., Borkowski, A., Brose, M., Rauscher, M., LeFevre, I., ... TIDES Study Group (2019). Efficacy of a Tetravalent Dengue Vaccine in Healthy Children and Adolescents. *The New England journal of medicine*, 381(21), 2009–2019. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1903869>
4. Bown, C. P., & Bollyky, T. J. (2022). How COVID-19 vaccine supply chains emerged in the midst of a pandemic. *The World economy*, 45(2), 468–522. <https://doi.org/10.1111/twec.13183>
5. Choi, M. J., Cossaboom, C. M., Whitesell, A. N., Dyal, J. W., Joyce, A., Morgan, R. L., Campos-Outcalt, D., Person, M., Ervin, E., Yu, Y. C., Rollin, P. E., Harcourt, B. H., Atmar, R. L., Bell, B. P., Helfand, R., Damon, I. K., & Frey, S. E. (2021). Use of Ebola Vaccine: Recommendations of the Advisory Committee on Immunization Practices, United States, 2020. *MMWR. Recommendations and reports : Morbidity and mortality weekly report. Recommendations and reports*, 70(1), 1–12. <https://doi.org/10.15585/mmwr.rr7001a1>
6. Dagan, N., Barda, N., Kepten, E., Miron, O., Perchik, S., Katz, M. A., Hernán, M. A., Lipsitch, M., Reis, B., & Balicer, R. D. (2021). BNT162b2 mRNA Covid-19 Vaccine in a Nationwide Mass Vaccination Setting. *The New England*

<https://doi.org/10.1056/NEJMoa2101765>

7. Excler, J. L., Saville, M., Berkley, S., & Kim, J. H. (2021). Vaccine development for emerging infectious diseases. *Nature medicine*, 27(4), 591–600. <https://doi.org/10.1038/s41591-021-01301-0>
8. Feldman, R. A., Fuhr, R., Smolenov, I., Mick Ribeiro, A., Panther, L., Watson, M., Senn, J. J., Smith, M., Almarsson, Ö., Pujar, H. S., Laska, M. E., Thompson, J., Zaks, T., & Ciaramella, G. (2019). mRNA vaccines against H10N8 and H7N9 influenza viruses of pandemic potential are immunogenic and well tolerated in healthy adults in phase 1 randomized clinical trials. *Vaccine*, 37(25), 3326–3334. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2019.04.074>
9. Forman, R., Shah, S., Jeurissen, P., Jit, M., & Mossialos, E. (2021). COVID-19 vaccine challenges: What have we learned so far and what remains to be done?. *Health policy (Amsterdam, Netherlands)*, 125(5), 553–567. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2021.03.013>
10. Gouglas, D., Thanh Le, T., Henderson, K., Kaloudis, A., Danielsen, T., Hammersland, N. C., Robinson, J. M., Heaton, P. M., & Røttingen, J. A. (2018). Estimating the cost of vaccine development against epidemic infectious diseases: a cost minimisation study. *The Lancet. Global health*, 6(12), e1386–e1396. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(18\)30346-2](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(18)30346-2)
11. Hajj Hussein, I., Chams, N., Chams, S., El Sayegh, S., Badran, R., Raad, M., Gerges-Geagea, A., Leone, A., & Jurjus, A. (2015). Vaccines Through Centuries: Major Cornerstones of Global Health. *Frontiers in public health*, 3, 269. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2015.00269>
12. Hammitt, L. L., Dagan, R., Yuan, Y., Baca Cots, M., Bosheva, M., Madhi, S. A., Muller, W. J., Zar, H. J., Brooks, D., Grenham, A., Wählby Hamrén, U., Mankad, V. S., Ren, P., Takas, T., Abram, M. E., Leach, A., Griffin, M. P., Villafana, T., & MELODY Study Group (2022). Nirsevimab for Prevention of RSV in Healthy Late-Preterm and Term Infants. *The New England journal of medicine*, 386(9), 837–846. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2110275>
13. Haro Pérez, A. M., Jiménez Rodríguez, M., Martín Monteagudo, S., & Gutiérrez Zufiaurre, N. (2025). Tosferina como enfermedad reemergente.

- Situación epidemiológica en la provincia de Salamanca. *Vacunas*, 26(1), 100379. <https://doi.org/10.1016/j.vacun.2024.10.001>
14. Harrison, E. A., & Wu, J. W. (2020). Vaccine confidence in the time of COVID-19. *European journal of epidemiology*, 35(4), 325–330. <https://doi.org/10.1007/s10654-020-00634-3>
 15. Henao-Restrepo, A. M., Camacho, A., Longini, I. M., Watson, C. H., Edmunds, W. J., Egger, M., Carroll, M. W., Dean, N. E., Diatta, I., Doumbia, M., Draguez, B., Duraffour, S., Enwere, G., Grais, R., Gunther, S., Gsell, P. S., Hossmann, S., Wattle, S. V., Kondé, M. K., Kéïta, S., ... Kieny, M. P. (2017). Efficacy and effectiveness of an rVSV-vectored vaccine in preventing Ebola virus disease: final results from the Guinea ring vaccination, open-label, cluster-randomised trial (Ebola Ça Suffit!). *Lancet (London, England)*, 389(10068), 505–518. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)32621-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)32621-6)
 16. Jamrozik, E., & Selgelid, M. J. (2020). COVID-19 human challenge studies: ethical issues. *The Lancet. Infectious diseases*, 20(8), e198–e203. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30438-2](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30438-2)
 17. Kennedy, R. B., Ovsyannikova, I. G., Palese, P., & Poland, G. A. (2020). Current Challenges in Vaccinology. *Frontiers in immunology*, 11, 1181. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.01181>
 18. Larson, H. J., Jarrett, C., Schulz, W. S., Chaudhuri, M., Zhou, Y., Dube, E., Schuster, M., MacDonald, N. E., Wilson, R., & SAGE Working Group on Vaccine Hesitancy (2015). Measuring vaccine hesitancy: The development of a survey tool. *Vaccine*, 33(34), 4165–4175. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2015.04.037>
 19. Lazarus, J. V., Wyka, K., White, T. M., Picchio, C. A., Gostin, L. O., Larson, H. J., Rabin, K., Ratzan, S. C., Kamarulzaman, A., & El-Mohandes, A. (2023). A survey of COVID-19 vaccine acceptance across 23 countries in 2022. *Nature medicine*, 29(2), 366–375. <https://doi.org/10.1038/s41591-022-02185-4>
 20. Mathieu, E., Ritchie, H., Ortiz-Ospina, E., Roser, M., Hasell, J., Appel, C., Giattino, C., & Rodés-Guirao, L. (2021). A global database of COVID-19 vaccinations. *Nature human behaviour*, 5(7), 947–953. <https://doi.org/10.1038/s41562-021-01122-8>

21. Organización Mundial de la Salud. (2024, 24 de abril). Los esfuerzos mundiales en inmunización han salvado al menos 154 millones de vidas en los últimos 50 años. <https://www.who.int/es/news/item/24-04-2024-global-immunization-efforts-have-saved-at-least-154-million-lives-over-the-past-50-years>
22. Organización Panamericana de la Salud. (2023, 20 de abril). El riesgo de brotes de enfermedades prevenibles por vacunación en las Américas alcanza su nivel más alto en 30 años. <https://www.paho.org/es/noticias/20-4-2023-riesgo-brotes-enfermedades-prevenibles-por-vacunacion-americas-alcanza-su-nivel>
23. Organización Panamericana de la Salud. (s.f.). *Sarampión*. <https://www.paho.org/es/temas/sarampion>
24. Pardi, N., Hogan, M. J., & Weissman, D. (2020). Recent advances in mRNA vaccine technology. *Current opinion in immunology*, 65, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.coi.2020.01.008>
25. Patel, M. K., Goodson, J. L., Alexander, J. P., Jr, Kretsinger, K., Sodha, S. V., Steulet, C., Gacic-Dobo, M., Rota, P. A., McFarland, J., Menning, L., Mulders, M. N., & Crowcroft, N. S. (2020). Progress Toward Regional Measles Elimination - Worldwide, 2000-2019. *MMWR. Morbidity and mortality weekly report*, 69(45), 1700–1705. <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm6945a6>
26. Polack, F. P., Thomas, S. J., Kitchin, N., Absalon, J., Gurtman, A., Lockhart, S., Perez, J. L., Pérez Marc, G., Moreira, E. D., Zerbini, C., Bailey, R., Swanson, K. A., Roychoudhury, S., Koury, K., Li, P., Kalina, W. V., Cooper, D., Frenck, R. W., Jr, Hammitt, L. L., Türeci, Ö., ... C4591001 Clinical Trial Group (2020). Safety and Efficacy of the BNT162b2 mRNA Covid-19 Vaccine. *The New England journal of medicine*, 383(27), 2603–2615. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2034577>
27. Poland, G. A., Kennedy, R. B., Ovsyannikova, I. G., Palacios, R., Ho, P. L., & Kalil, J. (2018). Development of vaccines against Zika virus. *The Lancet. Infectious diseases*, 18(7), e211–e219. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(18\)30063-X](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(18)30063-X)
28. Pollard, A. J., & Bijker, E. M. (2021). A guide to vaccinology: from basic principles to new developments. *Nature reviews. Immunology*, 21(2), 83–100. <https://doi.org/10.1038/s41577-020-00479-7>

29. Rebollo García, L. et al. (2021). "Las enfermedades emergentes y reemergentes del siglo XXI". *Sanum*, nº 1, vol. 5, pp. 48-61.
30. Rivera, L., Biswal, S., Sáez-Llorens, X., Reynales, H., López-Medina, E., Borja-Tabora, C., Bravo, L., Sirivichayakul, C., Kosalaraksa, P., Martinez Vargas, L., Yu, D., Watanaveeradej, V., Espinoza, F., Dietze, R., Fernando, L., Wickramasinghe, P., Duarte Moreira Jr, E., Fernando, A. D., Gunasekera, D., Luz, K., ... Borkowski, A. (2022). Three-year Efficacy and Safety of Takeda's Dengue Vaccine Candidate (TAK-003). *Clinical infectious diseases : an official publication of the Infectious Diseases Society of America*, 75(1), 107–117. <https://doi.org/10.1093/cid/ciab864>
31. Stein F. (2021). Risky business: COVAX and the financialization of global vaccine equity. *Globalization and health*, 17(1), 112. <https://doi.org/10.1186/s12992-021-00763-8>
32. Sumner, T., Clark, R. A., Prys-Jones, T. O., Bakker, R., Churchyard, G., & White, R. G. (2025). The potential impact of new tuberculosis vaccines on the burden of tuberculosis in people with HIV in South Africa. *AIDS (London, England)*, 39(2), 175–183. <https://doi.org/10.1097/QAD.0000000000004038>
33. Tait, D. R., Hatherill, M., Van Der Meeren, O., Ginsberg, A. M., Van Brakel, E., Salaun, B., Scriba, T. J., Akite, E. J., Ayles, H. M., Bollaerts, A., Demoitié, M. A., Diacon, A., Evans, T. G., Gillard, P., Hellström, E., Innes, J. C., Lempicki, M., Malahleha, M., Martinson, N., Mesia Vela, D., ... Roman, F. (2019). Final Analysis of a Trial of M72/AS01E Vaccine to Prevent Tuberculosis. *The New England journal of medicine*, 381(25), 2429–2439. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1909953>
34. Van de Vuurst, P., Escobar, L.E. Climate change and infectious disease: a review of evidence and research trends. *Infect Dis Poverty* 12, 51 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40249-023-01102-2>
35. Vetter, V., Denizer, G., Friedland, L. R., Krishnan, J., & Shapiro, M. (2018). Understanding modern-day vaccines: what you need to know. *Annals of medicine*, 50(2), 110–120. <https://doi.org/10.1080/07853890.2017.1407035>
36. Vinck, P., Pham, P. N., Bindu, K. K., Bedford, J., & Nilles, E. J. (2019). Institutional trust and misinformation in the response to the 2018-19 Ebola outbreak in North Kivu, DR Congo: a population-based survey. *The Lancet*.

Infectious diseases, 19(5), 529–536. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(19\)30063-5](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(19)30063-5)

37. Voysey, M., Clemens, S. A. C., Madhi, S. A., Weckx, L. Y., Folegatti, P. M., Aley, P. K., Angus, B., Baillie, V. L., Barnabas, S. L., Borat, Q. E., Bibi, S., Briner, C., Cicconi, P., Collins, A. M., Colin-Jones, R., Cutland, C. L., Darton, T. C., Dheda, K., Duncan, C. J. A., Emary, K. R. W., ... Oxford COVID Vaccine Trial Group (2021). Safety and efficacy of the ChAdOx1 nCoV-19 vaccine (AZD1222) against SARS-CoV-2: an interim analysis of four randomised controlled trials in Brazil, South Africa, and the UK. *Lancet (London, England)*, 397(10269), 99–111. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)32661-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32661-1)
38. Wilder-Smith A. (2022). Dengue vaccine development: challenges and prospects. *Current opinion in infectious diseases*, 35(5), 390–396. <https://doi.org/10.1097/QCO.0000000000000871>
39. Wilson, S. L., & Wiysonge, C. (2020). Social media and vaccine hesitancy. *BMJ global health*, 5(10), e004206. <https://doi.org/10.1136/bmjgh-2020-004206>
40. Wouters, O. J., Shadlen, K. C., Salcher-Konrad, M., Pollard, A. J., Larson, H. J., Teerawattananon, Y., & Jit, M. (2021). Challenges in ensuring global access to COVID-19 vaccines: production, affordability, allocation, and deployment. *Lancet (London, England)*, 397(10278), 1023–1034. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)00306-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00306-8)
41. Yue, J., Liu, Y., Zhao, M., Bi, X., Li, G., & Liang, W. (2023). The R&D landscape for infectious disease vaccines. *Nature reviews. Drug discovery*, 22(11), 867–868. <https://doi.org/10.1038/d41573-023-00119-4>