Biotecnología e ingeniería genética

Test de 10 preguntas y flashcards de este tema en **farmeandopau.com** ›

Última revisión: 25 de octubre de 2026.

Escanea y haz el test del tema

LA IDEA EN 30 SEGUNDOS

La **biotecnología** usa seres vivos o sus componentes para obtener productos o servicios; la **tradicional** (pan, vino, yogur) lleva milenios con microorganismos, y la **moderna** se basa en la **ingeniería genética**: modificar directamente el ADN. Sus herramientas son las **enzimas de restricción** (cortan), la **ADN ligasa** (pega), los **vectores** (plásmidos y virus), la **PCR** (copia), la **electroforesis** (separa por tamaño), la **secuenciación** (lee) y **CRISPR-Cas9** (edita). Con ellas se obtienen **organismos modificados genéticamente** —los **transgénicos** llevan genes de otra especie—, **insulina recombinante**, **vacunas**, **terapias génicas** y **biorremediación**.

Cronología

1973
Stanley Cohen y Herbert Boyer insertan un gen en un plásmido y lo introducen en *E. coli*: nace el ADN recombinante

1978
Nobel de Medicina a Arber, Nathans y Smith por las enzimas de restricción

1982
Se aprueba en Estados Unidos la insulina humana producida por bacterias, primer fármaco recombinante

1983
Kary Mullis idea la PCR (Nobel de Química de 1993)

1990
Primer ensayo de terapia génica en una niña con inmunodeficiencia por falta de adenosina desaminasa (ADA)

2005
Francis Mojica (Universidad de Alicante), que había descrito las repeticiones CRISPR en arqueas, publica que son un sistema de defensa contra virus

2012
Emmanuelle Charpentier y Jennifer Doudna convierten CRISPR-Cas9 en unas tijeras programables (Nobel de Química de 2020)

2024
La UE autoriza (de forma condicional, en febrero) Casgevy, el primer medicamento basado en la edición con CRISPR (anemia falciforme y β-talasemia); el Reino Unido había sido el primer país en aprobarlo, en noviembre de 2023

1 Biotecnología: concepto, tipos y colores

- **Biotecnología**: conjunto de técnicas que utilizan **seres vivos** (sobre todo microorganismos), **células** o sus **moléculas** para obtener productos o servicios útiles para el ser humano.
- **Biotecnología tradicional**: aprovecha organismos tal como son, seleccionándolos durante siglos: fermentaciones del pan, el vino, la cerveza, el yogur o el queso; selección de plantas y animales.
- **Biotecnología moderna**: modifica **directamente el material genético** con técnicas de **ingeniería genética** (ADN recombinante, PCR, CRISPR). La piden comparar **Extremadura** y **La Rioja**.
- **Ingeniería genética**: conjunto de técnicas que permiten **aislar, cortar, copiar, modificar y transferir genes** de un organismo a otro, de forma dirigida.

- El **papel de los microorganismos** es central: crecen deprisa, en medios baratos, se modifican con facilidad y producen moléculas que no fabricarían de otra forma.

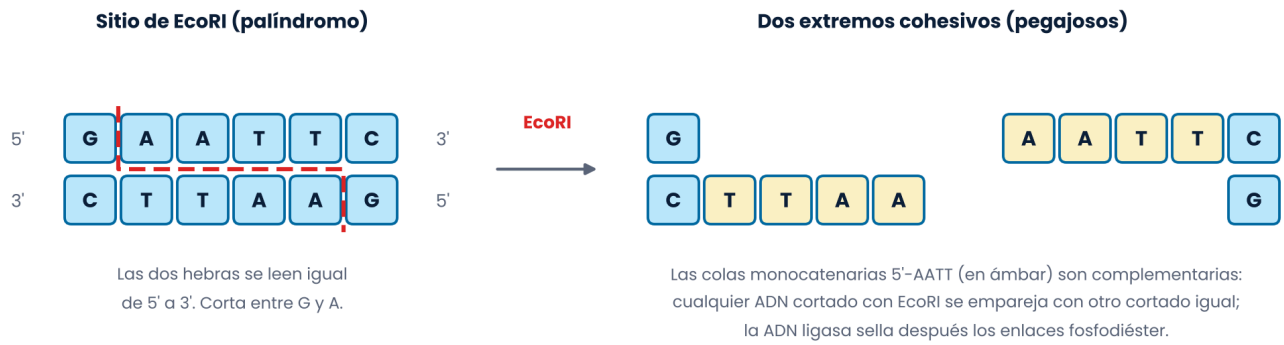
Color	Ámbito	Ejemplos
Roja	Salud	Insulina y vacunas recombinantes, antibióticos, terapia génica, diagnóstico por PCR
Verde	Agricultura	Maíz Bt resistente a insectos, plantas tolerantes a la sequía, biofertilizantes
Blanca	Industria	Enzimas para detergentes, bioplásticos, bioetanol
Gris	Medio ambiente	Biorremediación, depuración de aguas, compostaje
Azul	Mar	Fármacos de organismos marinos, acuicultura, vacunas para peces
Amarilla	Alimentación	Pan, vino, cerveza, quesos, alimentos funcionales
Negra	Bioterrorismo y biodefensa	Detección de agentes biológicos, antídotos

La clasificación por colores no es universal. Te la piden en **Murcia** (anexo VI, con los siete colores de esta tabla), **Canarias** (roja, verde, gris, blanca y azul) y la **Comunitat Valenciana**.

2 Las herramientas: enzimas de restricción, ligasa y vectores

- **Enzimas de restricción** (endonucleasas de restricción): enzimas bacterianas que **reconocen una secuencia corta y específica** del ADN (**sitio de restricción**, casi siempre un **palíndromo** de 4–8 pares de bases) y **cortan** las dos hebras allí. En la bacteria la **defienden de los fagos**: cortan el ADN vírico, mientras que el suyo está protegido por metilación.
- Unas cortan de forma **escalonada** y dejan **extremos cohesivos** (monocatenarios y complementarios entre sí: *EcoRI*); otras cortan recto y dejan **extremos romos** (*SmaI*). Si el gen y el vector se cortan con **la misma enzima**, sus extremos encajan.
- **ADN ligasa**: **une** fragmentos de ADN formando **enlaces fosfodiéster**. Sella el gen dentro del vector.
- **Transcriptasa inversa**: fabrica **ADN complementario (ADNc)** a partir del **ARNm** maduro. Los genes eucariotas tienen **intrones** y las bacterias **no saben eliminarlos** (no hacen *splicing*); el ADNc ya no los tiene.
- **Vector de clonación**: molécula de ADN que **transporta el gen** a la célula huésped y **se replica** dentro de ella. Los más usados: **plásmidos** (en bacterias y levaduras), **bacteriófagos** como el λ y **virus** modificados (adenovirus, lentivirus, virus adenoasociados) para células animales y terapia génica. En plantas se usa el plásmido Ti de *Agrobacterium tumefaciens*.
- Un plásmido vector tiene: **origen de replicación** (para copiarse solo), un **gen marcador** (resistencia a un antibiótico, para **seleccionar** las bacterias que lo han captado) y un **sitio de clonación** con dianas de restricción.

Enzima	Qué hace	Para qué sirve
Enzima de restricción	Corta el ADN en una secuencia concreta	Aislar un gen y abrir el vector
ADN ligasa	Une fragmentos de ADN (enlace fosfodiéster)	Formar el ADN recombinante
Transcriptasa inversa	Copia ARN a ADN	Obtener ADNc sin intrones; RT-PCR
ADN polimerasa termoestable (*Taq*)	Sintetiza ADN a unos 72 °C y resiste los 95 °C sin desnaturalizarse	PCR
Cas9	Corta el ADN donde la lleva un ARN guía	Editar genes (CRISPR)



Corte con *EcoRI*. La enzima reconoce 5'-GAATTC-3', que se lee igual en las dos hebras (palíndromo), y corta entre la G y la A de cada hebra. Quedan dos **extremos cohesivos** con cuatro bases desapareadas (5'-AATT) que se pueden emparejar con cualquier otro ADN cortado con la misma enzima.

3 ADN recombinante y clonación molecular

ADN recombinante: molécula de ADN formada uniendo fragmentos de **orígenes distintos** (un gen humano y un plásmido bacteriano). **Clonar un gen** es obtener muchas copias idénticas de él metiéndolo en un vector que se multiplica dentro de una célula.

1 1 Obtener el gen

Se corta del ADN con una **enzima de restricción**, se amplifica por **PCR** o, si es eucariota, se fabrica como **ADNc** con transcriptasa inversa a partir de su ARNm.

2 2 Cortar el vector

Se abre el plásmido con **la misma enzima de restricción**, que deja extremos cohesivos complementarios.

3 3 Unir: ADN recombinante

Gen y plásmido se emparejan por sus extremos y la **ADN ligasa** los une.

4 4 Transformar

Se introduce el plásmido en las células huésped (*E. coli*, levaduras) con **choque térmico** o **electroporación**.

5 5 Seleccionar

Se siembran en un medio con el **antibiótico**: solo crecen las que llevan el plásmido con el **gen de resistencia**.

6 6 Expresar y purificar

Las bacterias se cultivan en **fermentadores**, transcriben y traducen el gen y fabrican la proteína, que se purifica.

MADRID · PAU 2026 EXTRAORDINARIA · PREGUNTA 1 (OBLIGATORIA)

Con respecto a las aplicaciones biotecnológicas de la genética molecular: producción de insulina recombinante.

La insulina es una hormona esencial para los seres vivos. Antes de la década de 1980, la insulina usada con fines terapéuticos se obtenía a partir de páncreas de animales. En la actualidad, se produce insulina humana recombinante mediante técnicas de ingeniería genética a partir de un gen humano.

[Figura: una doble hélice de ADN cortada por la enzima A (proceso 1) y un plásmido abierto por la misma enzima A; los dos fragmentos se unen con la enzima B (proceso 2) y forman un plásmido recombinante; el plásmido entra en una bacteria (3); las bacterias crecen en un fermentador (4), y se obtiene un frasco de insulina (5).]

a) Con la ayuda del dibujo, indique las etapas fundamentales del proceso biotecnológico para obtener insulina humana recombinante, numeradas del «1» al «5». (0,5 puntos)

b) Identifique las enzimas señaladas con las letras «A» y «B» que intervienen en los procesos «1» y «2». Explique brevemente la función de estas enzimas en el proceso representado. (0,6 puntos)

c) El gen humano de la insulina tiene dos intrones, por lo que es necesario insertar en la bacteria ADN complementario obtenido a partir de un ARN maduro del gen. Indique la enzima necesaria para sintetizar el ADN complementario y explique brevemente por qué no es posible utilizar directamente el gen humano en bacterias. (0,5 puntos)

d) La producción de insulina recombinante implica la traducción de un gen humano por una bacteria. Explique cómo es posible que un organismo procariota pueda sintetizar una proteína humana funcional. (0,4 puntos)

Apartado a)

1. Lee el dibujo en orden y pon nombre a cada flecha.

SOLUCIÓN 1) **Obtención del gen** de la insulina; 2) **inserción del gen en un plásmido** (ADN recombinante); 3) **introducción del plásmido en bacterias** (transformación); 4) **cultivo** de las bacterias, que expresan el gen y sintetizan la proteína; 5) **purificación** de la insulina.

Apartado b)

1. A corta tanto el ADN humano como el plásmido: es una enzima de restricción.
2. B junta los dos fragmentos: es la ligasa.

SOLUCIÓN **A: enzimas de restricción** (endonucleasas), que **cortan el ADN en secuencias específicas** (sitios de restricción) y dejan extremos cohesivos complementarios en el gen y en el plásmido. **B: ADN ligasa**, que **une los fragmentos de ADN** formando enlaces fosfodiéster: sella el gen dentro del plásmido.

Apartado c)

1. ARN → ADN: la única enzima que lo hace es la transcriptasa inversa.
2. Relaciona con la maduración del ARNm (Tema 16): en eucariotas se eliminan los intrones por corte y empalme.

SOLUCIÓN La **transcriptasa inversa** (retrotranscriptasa). Las bacterias **carecen del sistema de corte y empalme (*splicing*)**: no pueden eliminar los intrones ni empalmar los exones, así que traducirían también los intrones y la proteína saldría más larga y no funcional.

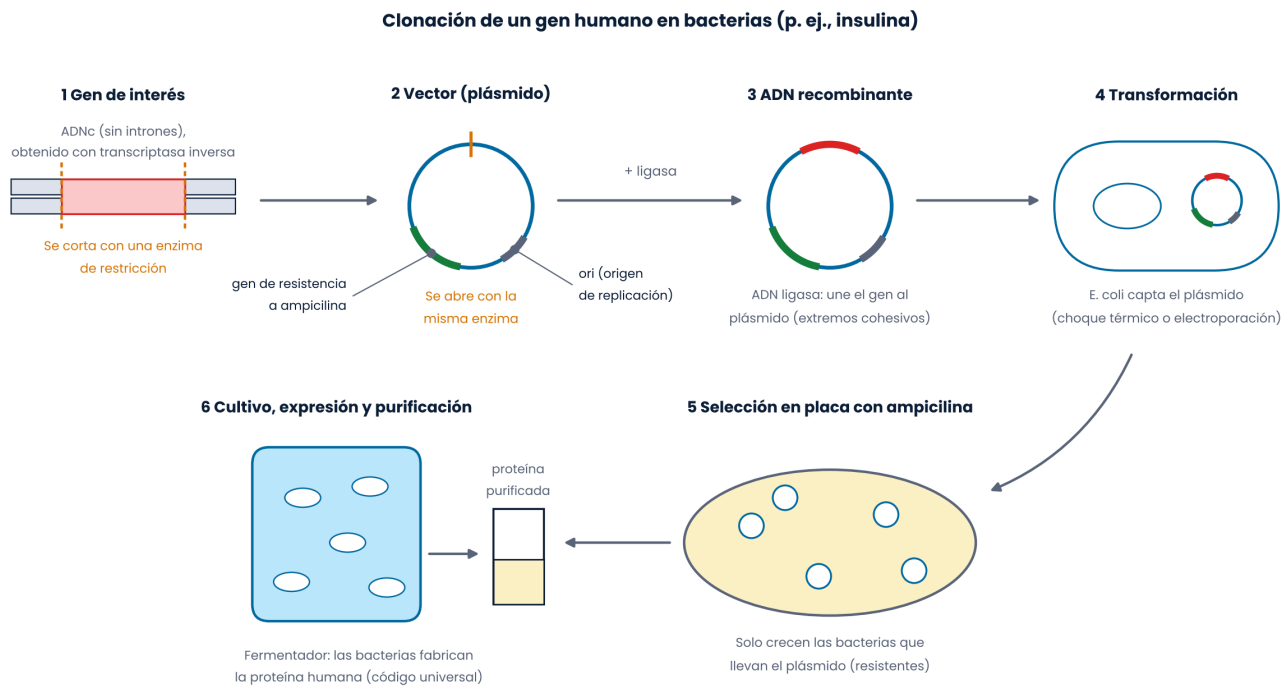
Apartado d)

1. Piensa en qué comparten bacteria y ser humano en la traducción.

SOLUCIÓN Porque el **código genético es universal**: los mismos codones codifican los mismos aminoácidos en todos los seres vivos, de modo que los ribosomas bacterianos traducen el ADNc humano y producen la misma secuencia de aminoácidos.

Lo que puntúa. a) 0,1 por etapa. b) 0,1 por nombrar cada enzima y 0,2 por explicar su función. c) 0,2 por la transcriptasa inversa y 0,3 por la ausencia de *splicing* en bacterias. d) 0,4 por la universalidad del código.

Error típico que te quita puntos. Decir que la bacteria «no tiene intrones» como respuesta a c): lo que importa es que **no puede eliminarlos** del gen humano. Y en b), nombrar las enzimas sin explicar su función: la mayor parte del punto (0,2 de cada 0,3) está en la explicación.



Clonación de un gen en un plásmido. El mismo esquema sirve para producir insulina, hormona del crecimiento o lactasa en bacterias. Una bacteria puede fabricar una proteína humana porque el **código genético es universal**.

4 La PCR: copiar millones de veces un fragmento de ADN

La **reacción en cadena de la polimerasa** (PCR) **amplifica** *in vitro* un fragmento concreto de ADN, de forma **exponencial**, a partir de una cantidad mínima. Es una replicación del ADN en un tubo, repetida en ciclos en un **termociclador**.

- **Reactivos**: el **ADN molde**; dos **cebadores** (*primers*), oligonucleótidos de ADN complementarios a los extremos del fragmento que se quiere copiar; los cuatro **desoxirribonucleótidos trifosfato** (dNTP); una **ADN polimerasa termoestable** (*Taq*), y un tampón con Mg^{2+}.
- Los **cebadores** delimitan el fragmento que se copia y aportan el **extremo 3'-OH libre** que la polimerasa necesita para empezar.
- La ***Taq* polimerasa** procede de *Thermus aquaticus*, una bacteria **termófila** descrita en 1969 por Thomas Brock y Hudson Freeze, que la aislaron de fuentes termales del parque de Yellowstone (Estados Unidos). Aguanta los 95 °C de la desnaturalización sin perder la actividad. Una polimerasa de una bacteria normal se **desnaturalizaría** en el primer ciclo (salió en Madrid, modelo de 2027).
- Cada ciclo **duplica** el fragmento: tras n ciclos se obtienen, como mucho, $N = N_0 \cdot 2^n$ moléculas. Con 30 ciclos, una sola molécula da unos mil millones de copias.
- **RT-PCR**: primero se pasa el **ARN a ADNc** con **transcriptasa inversa** y luego se amplifica. Sirve para detectar **virus de ARN** (SARS-CoV-2, VIH) y para medir la expresión de genes.
- **PCR cuantitativa** (en tiempo real): mide la fluorescencia en cada ciclo. Cuantas **más copias iniciales**, **menos ciclos** hacen falta para dar positivo (menor **Ct**): eso salió en **Navarra** en 2026.

- **Aplicaciones**: diagnóstico de infecciones y enfermedades genéticas, **pruebas de paternidad** e identificación forense, detección de transgénicos, clonación de genes, estudios evolutivos con ADN antiguo.

1 Desnaturalización (≈ 95 °C)

El calor rompe los **puentes de hidrógeno** entre las bases: las dos hebras se separan. Los enlaces fosfodiéster no se rompen.

2 Hibridación o alineamiento (≈ 50–65 °C)

Al enfriar, cada **cebador** se une a su secuencia complementaria en un extremo del fragmento, en una hebra distinta.

3 Extensión o elongación (≈ 72 °C)

La ***Taq* polimerasa** alarga cada cebador en sentido **5'→3'** añadiendo dNTP complementarios al molde. Se obtienen dos moléculas donde había una.

PREGUNTA RESUELTA (MADRID, MODELO DE 2027, 4.A)

Respecto a la Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR): a) Explique en qué consiste la Reacción en Cadena de la Polimerasa (0,2 puntos). b) Indique cuántas etapas tiene cada ciclo de PCR y describa brevemente qué ocurre en cada una de ellas (0,6 puntos). c) Explique qué sucedería si se añade a la reacción una ADN polimerasa obtenida de una bacteria que no es termorresistente (que no es termófila) (0,4 puntos). d) Explique por qué la PCR requiere cebadores o primers (0,4 puntos). e) Cite dos aplicaciones de esta técnica (0,4 puntos).

Respuesta modelo

a) Es una técnica que **amplifica de forma exponencial** un fragmento concreto de ADN *in vitro* a partir de una muestra muy pequeña, por ciclos repetidos de replicación.

b) **Tres etapas**: 1) **desnaturalización** (≈ 95 °C): se separan las dos hebras del ADN; 2) **hibridación** (≈ 55 °C): los cebadores se unen a sus secuencias complementarias; 3) **extensión** (≈ 72 °C): la ADN polimerasa termoestable sintetiza las hebras complementarias a partir de los cebadores.

c) La polimerasa **se desnaturalizaría** a la alta temperatura de la primera etapa y perdería su actividad: no se copiaría el ADN.

d) Porque la ADN polimerasa **no puede empezar una cadena de cero**: necesita un **extremo 3'-OH libre**, que aportan los cebadores. Además, al unirse a secuencias concretas, **delimitan el fragmento** que se amplifica.

e) **Diagnóstico** de infecciones (detección de virus o bacterias) y **pruebas de paternidad** o identificación forense.

Por qué puntúa. En d) puntúan las dos ideas: el 3'-OH y que delimitan el fragmento. En b), sin las tres temperaturas o lo que pasa en cada una, pierdes la mitad.

EXTREMADURA · PAU 2025 EXTRAORDINARIA · PREGUNTA 4, APARTADO D

Se lleva a cabo la amplificación mediante PCR un fragmento de uno de los genes presentes en este cromosoma. Si después de 3 ciclos se han obtenido 16000 moléculas, ¿cuántas moléculas de ADN había al comienzo del proceso? (1 punto).

D) Número de moléculas de ADN al comienzo del proceso. (1 punto)

Apartado D)

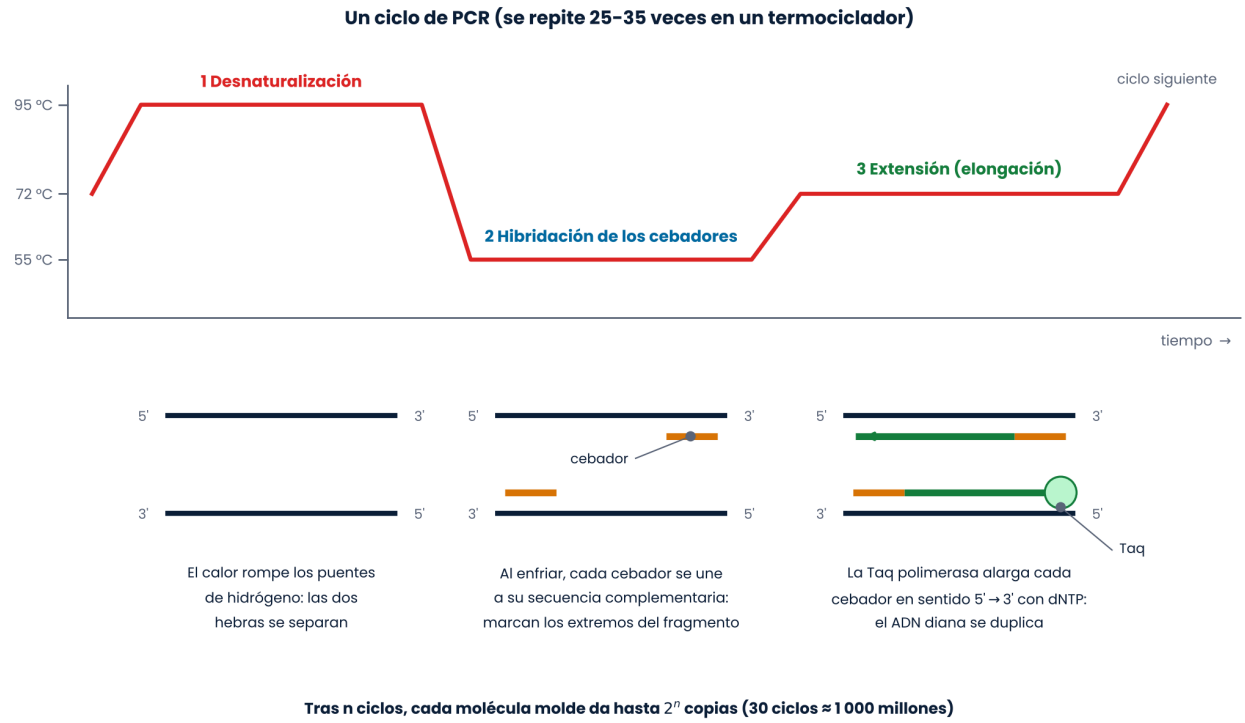
1. En cada ciclo cada molécula de ADN se duplica, así que el número se multiplica por 2: $N = N_0 \cdot 2^n$.
2. Con $n = 3$ ciclos: $2^3 = 8$. Es decir, $N_0 \to 2N_0 \to 4N_0 \to 8N_0$.

3. Despeja: $N_0 = \dfrac{N}{2^n} = \dfrac{16\,000}{8} = 2\,000$.

SOLUCIÓN Al principio había **2 000 moléculas** de ADN.

Lo que puntúa. El criterio oficial da hasta 1 punto por el resultado correcto (2 000 moléculas iniciales). Escribe la fórmula y el razonamiento: es lo que permite puntuar aunque te equivoques en la cuenta.

Error típico que te quita puntos. Multiplicar por 3 (un ciclo = ×3) o dividir entre $2 \cdot 3 = 6$. El crecimiento es **exponencial**: se divide entre $2^3 = 8$.



Un ciclo de PCR. Arriba, el perfil de temperatura del termociclador; abajo, lo que pasa con el ADN en cada etapa. Las temperaturas son las típicas: la de hibridación depende de los cebadores.

5 Electroforesis y secuenciación del ADN

- La **electroforesis en gel** separa fragmentos de ADN **por su tamaño**. Se cargan las muestras en pocillos de un gel de **agarosa** y se aplica una corriente: el ADN, con **carga negativa** por sus **grupos fosfato**, migra hacia el **polo positivo** (ánodo).
- El gel actúa como un tamiz: los fragmentos **pequeños avanzan más** y los grandes se quedan cerca del pocillo. El **marcador de peso molecular** (o de tamaño) es una mezcla de fragmentos de tamaño conocido que sirve de regla. Las bandas se ven con un colorante fluorescente bajo luz UV.
- Se usa tras una PCR o un corte con enzimas de restricción: **huellas genéticas** (forense, paternidad), comprobar si se ha amplificado un gen o diagnosticar mutaciones.
- **Secuenciar** es leer el **orden de los nucleótidos** de un fragmento de ADN. El método clásico es el de **Sanger** (1977): una replicación con **didesoxinucleótidos** (ddNTP), que **no tienen 3'-OH** y



Gel de agarosa al 1,2 % con dos marcadores de tamaño, teñido con un colorante fluorescente y fotografiado sobre un transiluminador de luz ultravioleta.

detienen la cadena; en la versión automatizada actual cada ddNTP lleva un marcador fluorescente distinto, y los fragmentos se separan por tamaño. Hoy hay técnicas de **secuenciación masiva**.

- La secuencia hace falta para diseñar **cebadores**, identificar genes, encontrar mutaciones y diseñar el **ARN guía** de CRISPR. **Madrid** pide su utilidad, «no es necesario conocer las diferentes técnicas»; **Andalucía**, solo saber que existe; la **Comunitat Valenciana**, **Canarias** y **Murcia** sí piden el fundamento de Sanger.

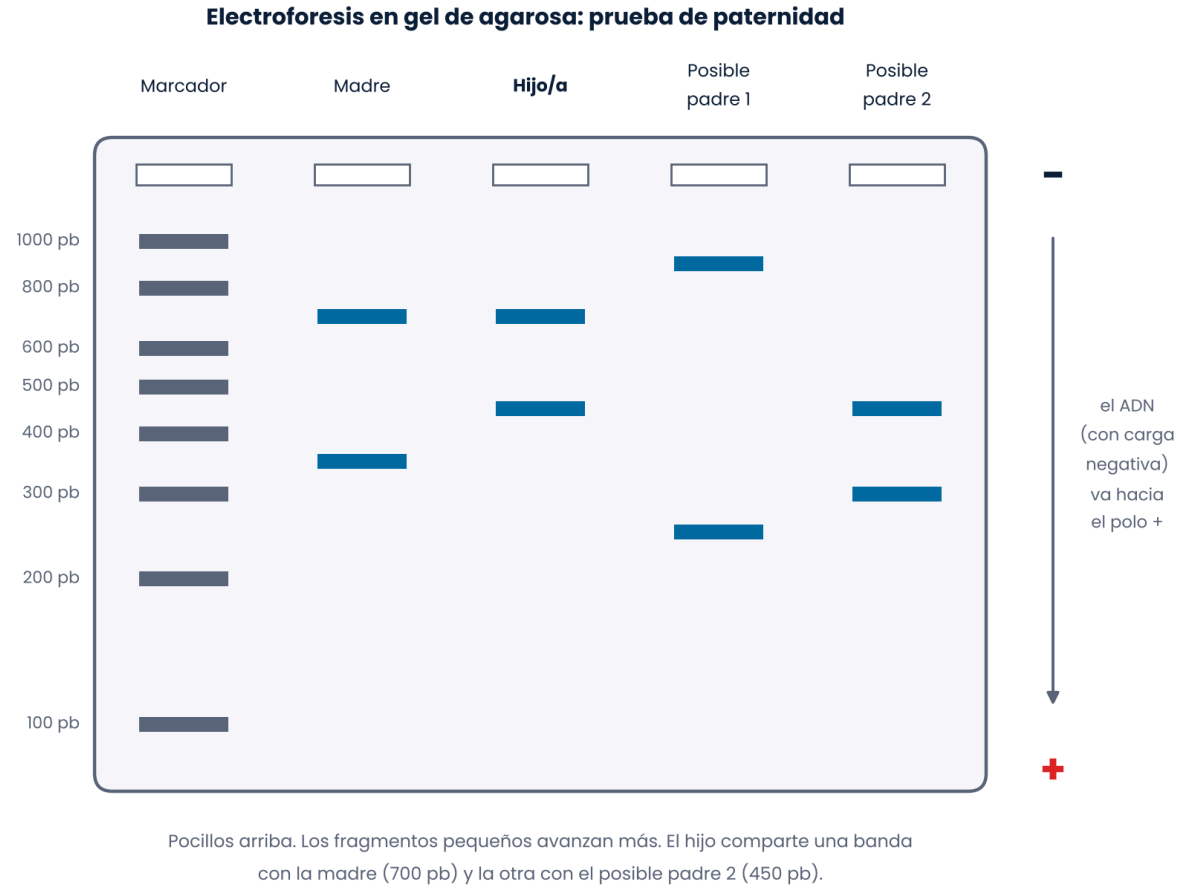
PREGUNTA RESUELTA (ARAGÓN, PAU 2026 EXTRAORDINARIA, 3.A C)

Para analizar el tamaño de los fragmentos obtenidos tras la técnica anterior [la PCR], ¿qué técnica se podría emplear? ¿Cómo permite esta técnica distinguir fragmentos de distinto tamaño? (0,5 puntos).

Respuesta modelo

La **electroforesis en gel** (de agarosa). Se colocan los fragmentos en pocillos y se aplica un campo eléctrico; el ADN, cargado negativamente por sus grupos fosfato, se desplaza hacia el **polo positivo**. El gel frena más a los fragmentos grandes, así que **los pequeños recorren más distancia**. Comparando con un **marcador de tamaño conocido** se calcula el tamaño de cada banda.

Por qué puntúa. El criterio oficial pide la técnica (electroforesis en gel) y que los fragmentos pequeños migran más rápido y más lejos. La carga negativa del ADN y el marcador completan una respuesta de 10.



Pocillos arriba. Los fragmentos pequeños avanzan más. El hijo comparte una banda con la madre (700 pb) y la otra con el posible padre 2 (450 pb).

Lectura de un gel en una prueba de paternidad (ejemplo ilustrativo con un solo marcador genético; en la realidad se analizan muchos). Cada persona tiene dos bandas, una de cada progenitor: la de 700 pb del hijo la comparte la madre y la de 450 pb solo puede venir del **posible padre 2**.

6 CRISPR-Cas9: editar genes

- **Origen natural**: las secuencias **CRISPR** son repeticiones cortas del genoma de bacterias y arqueas separadas por **espaciadores**, fragmentos del ADN de **virus** que infectaron antes a la célula. Funcionan como un **sistema inmunitario adquirido** procariota: el ARN transcrito de un espaciador guía a las nucleasas **Cas** hasta el ADN del virus si vuelve a entrar, y lo cortan.
- **Francis Mojica**, de la **Universidad de Alicante**, describió las repeticiones en la arquea *Haloferax mediterranei* (publicado en 1993; Yoshizumi Ishino ya las había visto en *E. coli* en 1987, sin saber qué eran), acuñó el nombre CRISPR junto a Ruud Jansen y propuso en 2005 su función defensiva.
- En 2012, **Emmanuelle Charpentier** y **Jennifer Doudna** demostraron que la proteína **Cas9** (de *Streptococcus pyogenes*) puede programarse con un **ARN guía** para cortar **cualquier** secuencia de ADN. **Nobel de Química de 2020**.
- **Cómo funciona**: el **ARN guía** tiene unos **20 nucleótidos** complementarios al ADN que se quiere cortar; Cas9 busca esa secuencia junto a una **PAM** (en Cas9, 5'-NGG-3') y **corta las dos hebras**. La célula repara el corte: por **unión de extremos no homólogos**, que suele dejar inserciones o deleciones y **inactiva el gen**, o por **reparación dirigida por homología**, que copia un **ADN molde** añadido y permite **corregir** una mutación o **insertar** una secuencia.
- Ventaja sobre los mutágenos físicos o químicos (Andalucía, 2025): es **dirigida** a un gen concreto, precisa, barata y rápida; los mutágenos causan cambios **al azar**.
- **Aplicaciones**: estudiar la función de genes (ratones *knockout*), **terapia génica** (Casgevy, para la anemia falciforme y la β-talasemia), mejora de cultivos y ganado, diagnóstico. Riesgos: **cortes fuera de la diana** (*off-target*) y los problemas éticos de editar **embriones**.
- **Cuánto entra**: Andalucía, «sin detallar su funcionamiento»; Comunitat Valenciana, «no se exigirá el conocimiento detallado»; **Murcia** (anexo V), **Extremadura** y **Canarias** piden los componentes y el mecanismo; **Madrid**, el concepto y la utilidad de la técnica (y en 2025 preguntó su papel en las bacterias).

PREGUNTA RESUELTA (MADRID, PAU 2025 ORDINARIA, 5.A A-C)

a) El término CRISPR hace referencia a determinadas secuencias de ADN distribuidas en el genoma de los organismos procariotas. Indique cuál es la función de dichas secuencias dentro de las células bacterianas (0,25 puntos). b) Qué función tienen las proteínas Cas en el sistema CRISPR-Cas de las bacterias (0,25 puntos). c) El sistema CRISPR-Cas ha sido adaptado y convertido en una nueva tecnología de ingeniería genética para ser utilizada en células eucariotas. Indique qué permite hacer esta nueva herramienta biotecnológica y mencione una aplicación de la misma en medicina (0,5 puntos).

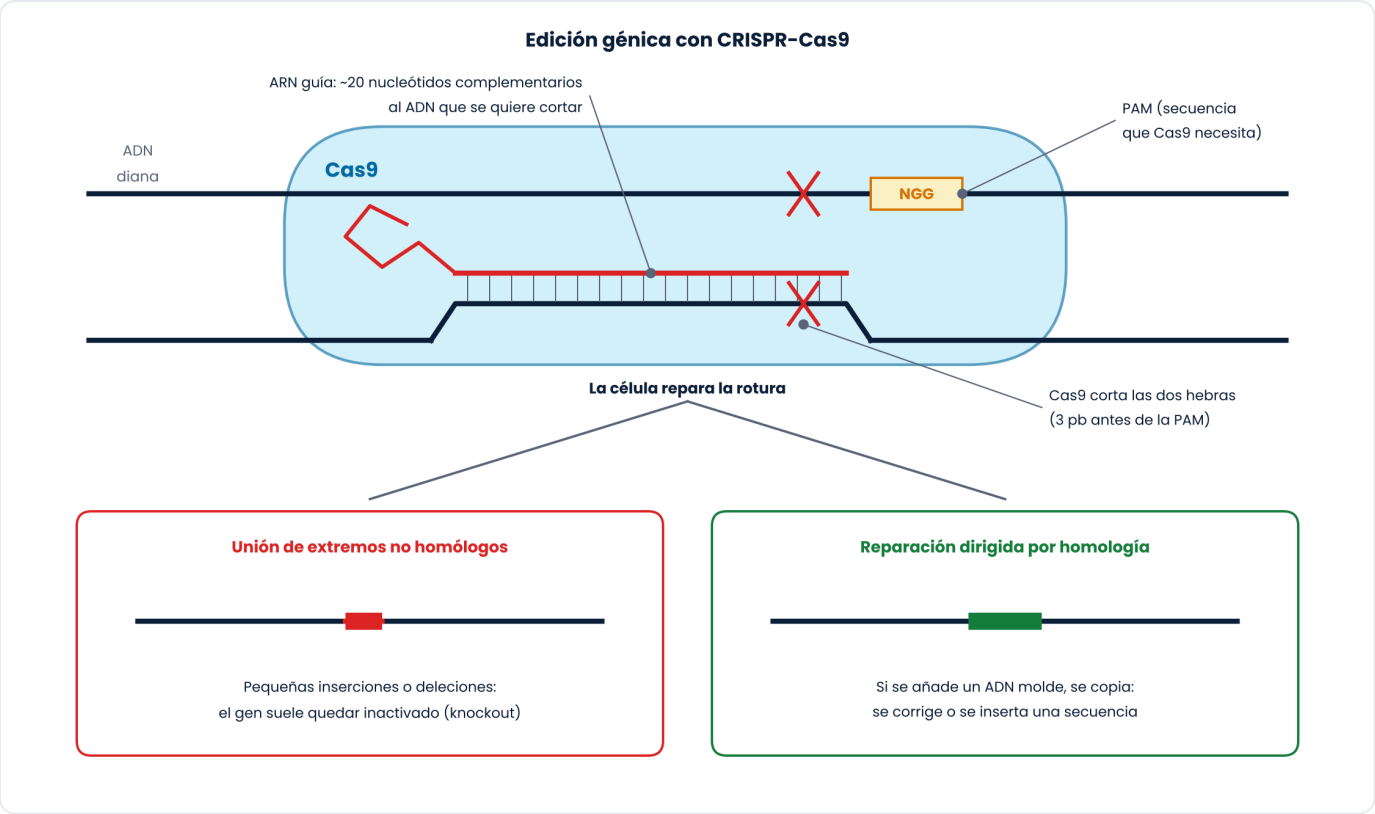
Respuesta modelo

a) Son parte de un **sistema de defensa** de las bacterias **frente a los virus**: guardan fragmentos del ADN de virus que las infectaron (espaciadores), una especie de «memoria» que permite reconocerlos y destruirlos si vuelven.

b) Las proteínas Cas son **endonucleasas**: guiadas por el ARN transcrito de las secuencias CRISPR, **cortan y degradan el material genético del virus** en una nueva infección.

c) Permite **editar genes**: cortar el ADN en un punto elegido y **eliminar, inactivar, corregir o insertar** secuencias. Aplicación médica: **terapia génica** de enfermedades genéticas, como la **anemia falciforme**, editando las células madre de la médula ósea del paciente.

Por qué puntúa. Los criterios de Madrid dan 0,25 por la idea de «defensa contra virus», 0,25 por «endonucleasas que cortan el ADN vírico» y 0,25 + 0,25 por «editar genes» y una aplicación.



CRISPR-Cas9. El ARN guía se empareja con la hebra complementaria del ADN diana; Cas9 corta las dos hebras cerca de la PAM, y la célula repara la rotura de una de dos maneras.

7 OMG, transgénicos y terapia génica

- **Organismo modificado genéticamente (OMG)**: aquel cuyo material genético se ha alterado de una forma que no se produce de manera natural por cruce o recombinación natural (definición de la Directiva 2001/18/CE). Incluye añadir, eliminar o **editar** genes propios.
- **Organismo transgénico**: OMG que lleva un **gen de otra especie** (el **transgén**). **Todo transgénico es un OMG, pero no todo OMG es transgénico**: un ratón con un gen propio inactivado o una planta editada con CRISPR sin ADN ajeno son OMG, no transgénicos.
- **Microorganismos recombinantes**: bacterias y levaduras que fabrican **insulina**, **hormona del crecimiento**, **vacunas** (la de la hepatitis B se produce en levaduras desde los años ochenta), enzimas como la **quimosina** del queso o la **lactasa**.
- **Plantas transgénicas**: se les introduce el gen con el plásmido **Ti** de *Agrobacterium tumefaciens* o por biolística. El **maíz Bt** lleva un gen de *Bacillus thuringiensis* que produce una proteína **tóxica para ciertas larvas de insectos** (como el taladro) e inocua para los mamíferos: el **MON 810** es el único transgénico cultivado en la UE, sobre todo en **España**. El **arroz dorado** fabrica β-caroteno (provitamina A).
- **Animales transgénicos**: se microinyecta el gen en el **cigoto**. Sirven como **modelos de enfermedades humanas** (ratones) o para producir fármacos en la leche.
- **Terapia génica**: tratar una enfermedad **introduciendo, corrigiendo o silenciando genes** en las células del paciente. *Ex vivo*: se sacan las células, se modifican y se devuelven (Casgevy; células **CAR-T**). *In vivo*: se inyecta el vector (un **virus adenoasociado** en **Zolgensma**, para la atrofia muscular espinal). Se hace en **células somáticas**: no pasa a los hijos.
- **Clonación de organismos** (≠ clonación de un gen): obtener un individuo genéticamente idéntico a otro por **transferencia nuclear**, como la oveja **Dolly** (1996). Salió en **Navarra** y **Canarias**.

PREGUNTA RESUELTA (ARAGÓN, PAU 2026 EXTRAORDINARIA, 3.B)

A continuación se presentan varias situaciones. Para cada una indique: i) qué técnica biotecnológica se podría usar y explíquela brevemente y ii) si intervienen organismos modificados genéticamente, organismos transgénicos o ninguno de ellos. Justifique su respuesta. a) Una bacteria que produce insulina gracias a la inserción del gen humano de la insulina sin intrones (0,7 puntos). b) Investigador que corrige un gen defectuoso en células para tratar una enfermedad hereditaria (0,6 puntos). c) Analizar un cepillo de dientes usado para identificar al propietario en un laboratorio forense (0,7 puntos).

Respuesta modelo

a) **ADN recombinante y clonación**: se corta el ADNc de la insulina y un plásmido con la misma enzima de restricción, se unen con la ligasa y el plásmido recombinante se introduce en *E. coli* (transformación), que expresa el gen. Es un **organismo transgénico** (y, por tanto, OMG): lleva un gen de **otra especie**.

b) **Terapia génica con edición CRISPR-Cas9**: un ARN guía complementario a la secuencia mutada dirige a Cas9, que corta allí, y la célula repara la rotura copiando un molde con la secuencia correcta. Son células **modificadas genéticamente (OMG)**, pero **no transgénicas**: se corrige un gen propio sin añadir genes de otra especie.

c) **PCR y electroforesis**: se extrae el ADN de las células del cepillo, se amplifican regiones muy variables entre personas y se comparan los fragmentos en un gel con el ADN del sospechoso. **Ninguno**: solo se analiza el ADN, no se modifica ningún organismo.

Por qué puntúa. En a), los criterios consideran incompleto contestar solo «OMG»: hay que decir **transgénico** y por qué. En b), «OMG porque se modifica un gen propio sin añadir genes de otra especie».

8 Aplicaciones: salud, agricultura, medio ambiente e industria

Salud

Insulina recombinante (primer fármaco recombinante, aprobado en 1982), **hormona del crecimiento**, interferón, factores de coagulación; **vacunas** recombinantes y de ARNm; **anticuerpos monoclonales** (técnica de los hibridomas de Köhler y Milstein, 1975); **antibióticos** de hongos (*Penicillium*) y bacterias (*Streptomyces*); diagnóstico por **PCR**; terapia génica.

Agricultura y ganadería

Plantas **resistentes a plagas** (maíz Bt), a herbicidas, a la sequía o con más nutrientes (arroz dorado); **bioinsecticidas** con *Bacillus thuringiensis*; **biofertilizantes** con bacterias fijadoras de nitrógeno (*Rhizobium*); animales resistentes a enfermedades.

Medio ambiente

Biorremediación: usar seres vivos, sobre todo microorganismos, para **degradar o eliminar contaminantes**: bacterias que degradan **hidrocarburos** en las mareas negras, **depuración de aguas residuales** (fangos activados), **compostaje**, **fitorremediación** con plantas que acumulan metales. **Biolixiviación**: *Acidithiobacillus ferrooxidans* extrae metales como el cobre de minerales pobres.

Industria y energía

Enzimas para detergentes y alimentos; **ácidos orgánicos** (cítrico, con *Aspergillus niger*) y **aminoácidos** (glutamato); **bioetanol** (fermentación alcohólica de levaduras), **biogás** (arqueas metanógenas), **bioplásticos** biodegradables como los PHA de *Cupriavidus necator* (Cataluña, 2026).

9 Los microorganismos en la industria alimentaria

Es de las preguntas que más se repiten: ha salido en **Andalucía**, **Aragón**, **Cantabria**, **Madrid**, el **País Vasco** y **Galicia**. La bioquímica de las fermentaciones está en el **Tema 13**; aquí, quién las hace y para qué.

Alimento	Microorganismo	Proceso y resultado
Pan	Levadura *Saccharomyces cerevisiae*	Fermentación alcohólica: el **CO_2** hace subir y esponja la masa; el etanol se evapora en el horno
Pan de masa madre	Levaduras y bacterias lácticas (lactobacilos)	Alcohólica + láctica: el **ácido láctico** da el sabor ácido
Vino	Levaduras (*S. cerevisiae*) del hollejo o añadidas	Fermentación alcohólica del mosto: los azúcares de la uva pasan a **etanol** y CO_2
Cerveza	*S. cerevisiae* (ale) o *S. pastorianus* (lager)	Fermentación alcohólica del mosto de cebada malteada
Yogur	*Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus*	Fermentación láctica de la lactosa: el ácido láctico **baja el pH** y la **caseína coagula** (precipita al acercarse a su punto isoeléctrico)
Queso	Bacterias lácticas; mohos (*Penicillium roqueforti* en los azules, como el Cabrales)	Cuajo (quimosina) + fermentación láctica + maduración
Vinagre	Bacterias acéticas (*Acetobacter*)	**Oxidación aerobia** del etanol a ácido acético: no es una fermentación

En España, para llamarse **yogur** el producto debe llevar esas dos bacterias **vivas**, al menos 10^7 unidades formadoras de colonias por gramo o mililitro (Real Decreto 271/2014); si se pasteuriza después de fermentar, debe llamarse «yogur pasteurizado después de la fermentación». En la cerveza o el vino, si entra aire las levaduras **respiran** y casi dejan de producir alcohol (efecto que preguntó Andalucía en 2026).

PREGUNTA RESUELTA (ANDALUCÍA, PAU 2026 EXTRAORDINARIA, EJERCICIO 1 OBLIGATORIO)

El uso de microorganismos es fundamental en diversos procesos biotecnológicos. Para cada uno de los siguientes casos, explique la causa biológica que justifica el resultado observado: a) Tras el amasado del pan, la masa debe reposar para que aumente su volumen y adquiera su textura esponjosa [0,4]. b) El pan de masa madre utiliza, además de levaduras, bacterias del género *Lactobacillus*, que aportan un sabor ácido [0,4]. c) La producción de cerveza se realiza en tanques herméticos. Una avería provoca la entrada de aire causando un descenso drástico en la producción de alcohol, aunque las levaduras siguen vivas y multiplicándose [0,4]. d) Se transforman bacterias de *E. coli* con un plásmido que contiene un gen de interés y un gen de resistencia a un antibiótico. Cuando se cultivan en un medio con dicho antibiótico, se observa que sólo sobreviven el 5 % de las bacterias [0,4]. e) Al introducir el gen humano de la insulina en una bacteria, en lugar de sintetizar insulina, produce un polipéptido de mayor tamaño y no funcional [0,4].

Respuesta modelo

a) Durante el reposo, las levaduras hacen la **fermentación alcohólica** de los azúcares de la harina y desprenden **CO_2**, que queda atrapado en la masa y la hincha.

b) Los lactobacilos hacen la **fermentación láctica**: producen **ácido láctico**, que da el sabor ácido.

c) *Saccharomyces* es **anaerobia facultativa**: con O_2 hace **respiración celular aerobia**, que da mucho más ATP (por eso crece más), y deja de fermentar, así que apenas produce etanol.

d) Solo sobreviven las bacterias **transformadas**, que han incorporado el plásmido con el **gen de resistencia**; el antibiótico **selecciona** el 5 % que lo captó.

e) El gen humano tiene **intrones** y las bacterias **no pueden eliminarlos** (no hacen corte y empalme): los traducen y sale un polipéptido más largo y no funcional. Por eso se usa **ADNc**.

Por qué puntúa. Cada caso vale 0,4 y el criterio solo pide la causa: CO_2 de la fermentación alcohólica, ácido láctico, respiración en presencia de O_2, selección de transformadas e intrones sin eliminar.

10 Bioética y normativa

- **Ventajas**: medicamentos más seguros y baratos (la insulina humana recombinante sustituyó a la de cerdo y vaca), diagnósticos rápidos, cultivos que necesitan menos insecticidas, tratamiento de la contaminación.
- **Riesgos y debates**: que los transgenes pasen a especies silvestres, efectos sobre insectos no diana, aparición de plagas resistentes, dependencia de las empresas de semillas, alergias (se evalúan antes de autorizar), **resistencia a antibióticos** si se usan genes marcadores, desigualdad en el acceso a las terapias y la **edición de embriones**.
- En 2018, He Jiankui anunció en China el nacimiento de dos niñas con el gen *CCR5* editado con CRISPR: fue condenado y la comunidad científica lo rechazó por razones de seguridad y ética.
- En la **UE**, los OMG necesitan una evaluación de riesgos (EFSA) y una autorización caso por caso: **Directiva 2001/18/CE** (liberación en el medio ambiente) y **Reglamentos (CE) 1829/2003 y 1830/2003** (alimentos y piensos, trazabilidad y **etiquetado obligatorio** de los alimentos que contienen OMG o se fabrican a partir de ellos; solo se libra la presencia **accidental o técnicamente inevitable** de hasta el **0,9 %** de cada ingrediente). En España, la **Ley 9/2003**, de 25 de abril.
- El **Reglamento (UE) 2026/1388**, de 17 de junio de 2026, regula las plantas obtenidas con **nuevas técnicas genómicas** (edición como CRISPR): las que tienen cambios que también podrían aparecer de forma natural o por mejora convencional (**categoría 1**) dejarán de regirse por las normas de los OMG (sus semillas sí se etiquetarán); las de la **categoría 2** siguen siendo OMG. Está en vigor desde el 16 de julio de 2026 y se aplicará desde el **17 de julio de 2028**.
- El **Convenio de Oviedo** (Consejo de Europa, 1997; en vigor en España desde 2000) solo permite modificar el genoma humano con fines preventivos, diagnósticos o terapéuticos y **prohíbe** introducir cambios en el genoma de la **descendencia** (línea germinal).

Conceptos clave

Biotecnología

Conjunto de técnicas que utilizan seres vivos, células o sus moléculas para obtener productos o servicios útiles para el ser humano.

Ingeniería genética

Conjunto de técnicas que permiten aislar, modificar, copiar y transferir genes de forma dirigida, de un organismo a otro o dentro del mismo.

Enzima de restricción

Endonucleasa bacteriana que reconoce una secuencia corta y específica del ADN (sitio de restricción, generalmente palindrómica) y corta allí las dos hebras.

Extremos cohesivos

Extremos monocatenarios y complementarios que deja una enzima de restricción con corte escalonado; se emparejan con cualquier ADN cortado con la misma enzima.

ADN ligasa

Enzima que une dos fragmentos de ADN formando un enlace fosfodiéster entre el 3'-OH de uno y el 5'-fosfato del otro; sella los fragmentos de Okazaki en la replicación y, en ingeniería genética, une el fragmento al vector.

ADN recombinante

Molécula de ADN formada al unir fragmentos de orígenes distintos, por ejemplo, un gen humano y un plásmido bacteriano.

Vector de clonación

Molécula de ADN capaz de replicarse en una célula huésped que se usa para introducir en ella un gen: plásmidos, bacteriófagos o virus modificados.

Clonación molecular

Obtención de muchas copias idénticas de un fragmento de ADN insertándolo en un vector que se multiplica dentro de células huésped.

ADN complementario (ADNc)

ADN sintetizado por la transcriptasa inversa a partir de un ARNm maduro; no tiene intrones y puede expresarse en bacterias.

PCR

Reacción en cadena de la polimerasa: técnica que amplifica in vitro un fragmento concreto de ADN mediante ciclos de desnaturalización, hibridación de cebadores y extensión por una ADN polimerasa termoestable.

Cebador (primer)

Fragmento corto de ácido nucleico, complementario al molde, que aporta el extremo 3'-OH libre que necesita la ADN polimerasa para empezar a añadir nucleótidos. En la replicación es de ARN y lo fabrica la primasa; en la PCR es un oligonucleótido de ADN sintético que delimita la región que se amplifica.

Taq polimerasa

ADN polimerasa termoestable de la bacteria termófila Thermus aquaticus; resiste la desnaturalización a unos 95 °C y por eso se usa en la PCR.

RT-PCR

PCR precedida de una retrotranscripción del ARN a ADNc; sirve para detectar virus de ARN o medir la expresión de genes.

Electroforesis en gel

Técnica que separa fragmentos de ADN por tamaño en un gel sometido a un campo eléctrico: el ADN, cargado negativamente, va hacia el polo positivo y los fragmentos pequeños avanzan más.

Secuenciación

Determinación del orden de los nucleótidos de un fragmento de ADN; el método de Sanger usa didesoxinucleótidos que detienen la síntesis.

CRISPR-Cas9

Sistema de defensa bacteriano contra virus adaptado como herramienta de edición: un ARN guía lleva a la nucleasa Cas9 a una secuencia concreta del ADN, que corta para inactivar, corregir o insertar genes.

OMG

Organismo modificado genéticamente: aquel cuyo material genético se ha alterado de una forma que no se produce naturalmente por cruce o recombinación natural.

Organismo transgénico

OMG que lleva incorporado un gen de otra especie (transgén).

Terapia génica

Tratamiento de una enfermedad mediante la introducción, corrección o silenciamiento de genes en las células del paciente, generalmente somáticas.

Biorremediación

Uso de seres vivos, sobre todo microorganismos, para degradar o eliminar contaminantes del medio ambiente.

Anticuerpo monoclonal

Anticuerpo idéntico producido por un único clon de células (originalmente, un hibridoma) que reconoce un solo epítopo; se usa en diagnóstico y tratamiento.

MODO PAU

Seis claves que valen puntos

Tijeras y pegamento

Restricción corta en secuencias específicas (extremos cohesivos); **ligasa** une con enlaces fosfodiéster.

Insulina

ADNc con **transcriptasa inversa** (las bacterias no quitan intrones) + **código universal**.

PCR

95 °C separa · **55 °C** cebadores · **72 °C** *Taq*. Copias = $N_0 \cdot 2^n$.

Gel

ADN **negativo** → polo **+**; los **pequeños** llegan más lejos; compara con el **marcador**.

CRISPR

ARN guía + **Cas9** (corta) + **PAM**. En bacterias: defensa frente a virus. **Mojica**; Charpentier y Doudna, Nobel 2020.

OMG

Transgénico = gen de **otra especie**. Todo transgénico es OMG; no todo OMG es transgénico.

Cómo te lo pueden preguntar

- **Madrid (PAU 2026 extraordinaria):** «El gen humano de la insulina tiene dos intrones [...]. Indique la enzima necesaria para sintetizar el ADN complementario y explique brevemente por qué no es posible utilizar directamente el gen humano en bacterias (0,5 puntos)».
- **Andalucía (PAU 2026 ordinaria):** con un esquema de la PCR, «Nombre los enlaces que se rompen en la fase 1 y los que permanecen intactos dentro de la cadena» y «Nombre la enzima que interviene en la fase 3 y la característica que la diferencia de otras enzimas con la misma función».
- **Madrid (modelo de 2027):** «Explique qué sucedería si se añade a la reacción una ADN polimerasa obtenida de una bacteria que no es termorresistente (que no es termófila) (0,4 puntos)».
- **Navarra (PAU 2026 ordinaria):** «¿En qué consiste la PCR? Si el dato de PCR es el número de ciclos necesarios para resultado positivo, ¿para quién serían cada uno de los siguientes valores?: PCR=40, PCR=20 y PCR=4. Justifícalo (0,5 P)».
- **Extremadura (PAU 2026 extraordinaria):** «En la construcción de una vacuna de vector viral se emplean enzimas de restricción que generan extremos cohesivos. Explique qué son esos extremos y por qué facilitan la inserción de un fragmento de ADN en un vector (0,5 puntos)».
- **La Rioja (PAU 2026 extraordinaria):** planta bioluminiscente con genes del hongo *Neonothopanus nambi*: «¿Se puede considerar [...] un organismo modificado genéticamente (OMG)?» y «¿Se puede considerar como una planta transgénica? Justifica la respuesta».
- **Murcia (PAU 2026 extraordinaria):** «En relación con la biotecnología, mencione dos ejemplos de aplicaciones de la biotecnología en cada uno de los ámbitos: i) Marino (biotecnología azul) (0,5 puntos). ii) Agrícola (biotecnología verde) (0,5 puntos)».
- **Castilla y León (PAU 2026 ordinaria):** «Indique y describa brevemente los tres pasos principales de la técnica de PCR. Enumere 2 de los elementos necesarios para realizar esta técnica (1,0)» o «Defina los siguientes términos: biorremediación y organismos genéticamente modificados. (0,5)».
- **Galicia (PAU 2026 extraordinaria):** «Indique dos tipos de microorganismos utilizados frecuentemente en biotecnología. En cada caso, indique el proceso en el que intervienen y el ámbito de aplicación».
- **País Vasco (PAU 2026 extraordinaria):** «Cita un microorganismo que pueda realizar el proceso 2 [fermentación alcohólica]. Y otro que pueda realizar el proceso 3 [fermentación láctica]» e «Indica dos productos con interés económico-industrial que se obtendrían en cada uno de estos dos procesos».

No lo confundas

- **Clonar un gen** (muchas copias de un fragmento de ADN en un vector) ≠ **clonar un organismo** (individuo idéntico por transferencia nuclear, como Dolly).

- **OMG ≠ transgénico**: editar o inactivar un gen propio da un OMG que no es transgénico.
- En la desnaturalización de la PCR se rompen los **puentes de hidrógeno** entre bases, **no** los enlaces fosfodiéster.
- **PCR** amplifica *in vitro* (en un tubo, sin células) ≠ **clonación** con vector (dentro de células vivas).
- En el gel, el ADN va al polo **positivo** porque es **negativo**; los fragmentos que más avanzan son los **pequeños**.
- **Terapia génica somática** (no se hereda) ≠ **modificación de la línea germinal** (pasaría a los hijos; prohibida por el Convenio de Oviedo).
- El vinagre no es una fermentación: *Acetobacter* **oxida** el etanol con O_2 (respiración aerobia). Salió en Cataluña en 2026.

Ponte a prueba

Andalucía (PAU 2025 extraordinaria): «Identifique a qué enzimas hacen referencia las siguientes frases relacionadas con técnicas de ingeniería genética [0,8]: 1) Permite amplificar fragmentos de ADN a partir de cantidades mínimas. 2) Reconoce una secuencia específica de ADN y lo corta. 3) Se utiliza para unir fragmentos de ADN en la creación de vectores de clonación. 4) Permite editar genes de forma precisa usando un ARN guía».

Solución: 1) **ADN polimerasa termoestable** (*Taq* polimerasa), en la PCR. 2) **Enzima de restricción** (endonucleasa de restricción). 3) **ADN ligasa**. 4) **Cas9** (sistema CRISPR-Cas9).

Cataluña (PAU 2025 ordinaria): «La siguiente figura ilustra un plásmido estándar utilizado en el proceso de clonación del gen de la lactasa, el cual se introduce en bacterias para que estas fabriquen la lactasa. ¿Por qué el plásmido contiene su propio origen de replicación? ¿Qué utilidad tiene el gen de resistencia a los antibióticos? ¿Qué dos tipos de enzimas se tienen que utilizar para insertar el gen de la lactasa en el sitio de clonación del plásmido?».

Solución: Origen de replicación: para que el plásmido **se replique de forma autónoma** dentro de la bacteria y no se pierda en las divisiones (y se obtengan muchas copias). **Gen de resistencia**: es un **marcador de selección**: si se cultivan las bacterias con el antibiótico, solo crecen las que han incorporado el plásmido (transformadas). **Enzimas**: **de restricción**, para cortar el plásmido y el gen, y **ligasas**, para unirlos.

Castilla y León (PAU 2026 extraordinaria): «Ordene los siguientes procesos necesarios para obtener bacterias capaces de fabricar una proteína humana: 1. Expresión del gen y síntesis de la proteína. 2. Introducción del plásmido en la bacteria. 3. Selección de colonias transformadas. 4. Inserción del gen en un vector de clonación. 5. Aislamiento de gen humano. ¿Qué son las enzimas de restricción? Indique en cuáles de los procesos anteriores se utilizan».

Solución: Orden lógico: **5 → 4 → 2 → 3 → 1** (aislar el gen, insertarlo en el vector, transformar, seleccionar las colonias transformadas y cultivarlas para que expresen el gen). Los criterios oficiales escriben 5-4-2-1-3; si te sale, explica brevemente tu orden. Ojo: en esos criterios, al decir en qué procesos se usan las enzimas, los números no casan con los nombres; guíate por el nombre del proceso. Las **enzimas de restricción** son endonucleasas que **cortan el ADN en secuencias específicas** (sitios de restricción). Se usan en el **5** (cortar el gen del ADN humano) y en el **4** (abrir el plásmido para insertar el gen).

Extremadura (PAU 2026 extraordinaria): «En la construcción de una vacuna de vector viral se emplean enzimas de restricción que generan extremos cohesivos. Explique qué son esos extremos y por qué facilitan la inserción de un fragmento de ADN en un vector (0,5 puntos)».

Solución: Son **extremos monocatenarios** (unas pocas bases sin pareja) que quedan cuando la enzima corta las dos hebras de forma **escalonada**; como el sitio es palindrómico, los dos extremos son **complementarios** entre sí. Si el fragmento y el vector se cortan con **la misma enzima**, sus extremos se **emparejan por complementariedad de bases** y quedan colocados en su sitio; la **ADN ligasa** solo tiene que sellar los enlaces fosfodiéster.

La Rioja (PAU 2026 extraordinaria): «Se ha creado una planta que desprende luz de color verde neón en la oscuridad insertando en su ADN genes procedentes del hongo *Neonothopanus nambi*. […] a) ¿Se puede considerar la planta bioluminiscente mencionada en el texto como un organismo modificado genéticamente (OMG)? Justifica la respuesta. (0,5 puntos) b) ¿Se puede considerar como una planta transgénica? Justifica la respuesta. (0,5 puntos)».

Solución: a) **Sí**: su material genético se ha modificado artificialmente con técnicas de ingeniería genética, de una forma que no ocurre por cruce natural. b) **Sí**: los genes insertados proceden de **otra especie** (un hongo), así que es un organismo **transgénico**, un tipo particular de OMG.

Murcia (PAU 2026 extraordinaria): «Mencione dos ejemplos de aplicaciones de la biotecnología en cada uno de los ámbitos: i) Marino (biotecnología azul). ii) Agrícola (biotecnología verde)».

Solución: Azul: obtención de **fármacos** a partir de organismos marinos (por ejemplo, compuestos antitumorales de invertebrados o algas); **acuicultura** con peces mejorados o **vacunas para peces**; también fertilizantes o recuperación de especies acuáticas. **Verde**: **plantas transgénicas resistentes a plagas** (maíz Bt) o a la sequía; **biofertilizantes** con bacterias fijadoras de nitrógeno; **bioinsecticidas** con *Bacillus thuringiensis*; plantas con más nutrientes (arroz dorado).

Fuentes

1. Alberts et al., *Molecular Biology of the Cell*, 4.ª ed. (Garland, 2002), cap. 8 «Manipulating proteins, DNA, and RNA», NCBI Bookshelf
2. Lodish et al., *Molecular Cell Biology*, 4.ª ed. (Freeman, 2000), sección «Recombinant DNA and genomics», NCBI Bookshelf

3. Madigan, Bender, Buckley, Sattley y Stahl, *Brock. Biología de los microorganismos*, 14.ª ed. (Pearson, 2015)
4. Premio Nobel de Química 2020 (Charpentier y Doudna), nobelprize.org
5. Jinek et al., «A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity», *Science* 337 (2012): 816–821
6. Mojica et al., «Intervening sequences of regularly spaced prokaryotic repeats derive from foreign genetic elements», *Journal of Molecular Evolution* 60 (2005): 174–182
7. Ishino et al., «Nucleotide sequence of the *iap* gene… in *Escherichia coli*», *Journal of Bacteriology* 169 (1987): 5429–5433 (primera descripción de las repeticiones CRISPR)
8. Premios Nobel de Química 1993 (Mullis, PCR) y de Fisiología o Medicina 1978 (Arber, Nathans y Smith, enzimas de restricción), nobelprize.org
9. Brock y Freeze, «*Thermus aquaticus* gen. n. and sp. n., a nonsporulating extreme thermophile», *Journal of Bacteriology* 98 (1969): 289–297
10. Agencia Europea de Medicamentos, ficha de Casgevy (exagamglogén autotemcel; autorización condicional en la UE el 9 de febrero de 2024)
11. MHRA (Reino Unido), «MHRA authorises world-first gene therapy that aims to cure sickle-cell disease and transfusion-dependent β-thalassemia», 16 de noviembre de 2023
12. Real Decreto 271/2014, de 11 de abril, norma de calidad para el yogur (BOE núm. 102, de 28 de abril de 2014)
13. Directiva 2001/18/CE sobre la liberación intencional en el medio ambiente de organismos modificados genéticamente, EUR-Lex
14. Reglamento (CE) n.º 1829/2003 sobre alimentos y piensos modificados genéticamente (art. 12: umbral del 0,9 %), EUR-Lex
15. Ley 9/2003, de 25 de abril, régimen jurídico de la utilización confinada, liberación voluntaria y comercialización de OMG (BOE núm. 100, de 26 de abril de 2003)
16. Instrumento de ratificación del Convenio de Oviedo (BOE núm. 251, de 20 de octubre de 1999; art. 13)
17. Comisión Europea, «EU legislation on new genomic techniques for plants» (Reglamento (UE) 2026/1388: adopción, entrada en vigor y aplicación)
18. Reglamento (UE) 2026/1388, sobre las plantas obtenidas con determinadas nuevas técnicas genómicas, EUR-Lex
19. Exámenes y criterios de corrección de la PAU de Biología 2025–2027 de Madrid, Andalucía, Aragón, Extremadura, Cataluña, Castilla y León, La Rioja, Murcia, Navarra, Galicia y País Vasco

Imágenes: Esquema propio: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia a partir de Alberts et al., *Molecular Biology of the Cell*, cap. 8. · Esquema propio: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia a partir de Lodish et al., *Molecular Cell Biology*, cap. 5, y Madigan et al., *Brock*. · Esquema propio: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia a partir de Lodish et al., *Molecular Cell Biology*, cap. 5, y Saiki et al., *Science*, 1988. · Gel de agarosa: Joseph Elsbernd (CC BY-SA 2.0, Wikimedia Commons) · Esquema propio: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia (datos ficticios con fines didácticos). · Esquema propio: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia a partir de Jinek et al., *Science*, 2012, y de la información científica del Premio Nobel de Química 2020.

Apuntes de Farmeando PAU · farmeandopau.com · Revisados frente a fuentes. Última revisión: 25 de octubre de 2026. Licencia CC BY-NC-ND 4.0: puedes copiarlo y compartirlo citándonos, sin uso comercial ni cambios (las imágenes, con su propia licencia). ¿Un error? Avísanos desde la página del tema. Cómo los hacemos: farmeandopau.com/metodologia.