GRUPO BLR

# BIOLOGÍA: COMPOSICIÓN, FUNCIÓN Y REGULACIÓN DE LOS SERES VIVOS

ISBN: 978-9907-802-47-4

Cristhian Arturo Zambrano Cabrera
Luiggi Óscar Solano Maza
Gabriel David Muñoz Sagbay
Johnny Patricio España Murillo

2026

# BIOLOGÍA: COMPOSICIÓN, FUNCIÓN Y REGULACIÓN DE LOS SERES VIVOS

Cristhian Arturo Zambrano Cabrera

Luiggi Óscar Solano Maza

Gabriel David Muñoz Sagbay

Johnny Patricio España Murillo

**AUTORES**

UTMACH

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Universidad Técnica de Machala
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupoblr.com
https://grupoblr.com/libros-investigo
REPOSITORIO




Zambrano, C., Solano., L., Muñoz, G., España., J. (2026) Biología: Composición, función y regulación de los seres vivos. Grupo Editorial BLR.

© Cristhian Arturo Zambrano Cabrera
Luiggi Óscar Solano Maza
Gabriel David Muñoz Sagbay
Johnny Patricio España Murillo

Biología: Composición, función y regulación de los seres vivos.

**ISBN: 978-9907-802-47-4**

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

# Filiación de autores

**Cristhian Arturo Zambrano Cabrera**

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: czambrano@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0326-2773

**Luiggi Óscar Solano Maza**

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: losolano@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8629-7516

**Gabriel David Muñoz Sagbay**

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: gabrielsagbay5@gmail.com

ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9275-4959

**Johnny Patricio España Murillo**

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: patricioespana0912@gmail.com

ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9278-9489

## PREFACIO

Escribimos este libro desde el aula de la carrera de Bioquímica y Farmacia de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud, movidos por una comprobación que se repite cada periodo académico: quien se enfrenta por primera vez a la biología celular llega con curiosidad genuina y, al mismo tiempo, con la sospecha de que la asignatura se reduce a memorizar listas de orgánulos, rutas metabólicas y nombres propios que mañana habrá que devolver en un examen. Las obras mayores que citamos capítulo a capítulo resuelven con rigor la exigencia científica, si bien presuponen un lector que ya domina el vocabulario técnico y que sabe de antemano por qué importa cada pieza antes de encontrarse con ella; ese tramo previo, el del estudiante que todavía no dispone de semejante mapa, es el que quisimos cubrir.

Pensamos el texto para quienes cursan los primeros ciclos de Bioquímica y Farmacia y de las carreras afines del área química y de la salud, sin descuidar al docente que necesite secuencias listas para llevar a clase ni al profesional que quiera reponer fundamentos antes de avanzar hacia la farmacología, el laboratorio clínico o la biotecnología. Que la obra haya sido escrita por dos docentes y dos estudiantes de la propia carrera no es un dato accesorio, puesto que la presencia de quienes atraviesan ahora la asignatura operó como control permanente de claridad: ninguna explicación quedó en el manuscrito sin antes sostenerse frente al lector al que estaba destinada.

De ahí que se encuentre con frecuencia la analogía y la pregunta directa, con la célula descrita como una ciudad en plena actividad, el

metabolismo entendido como la economía que la sostiene y la clasificación enzimática ordenada al modo de los pasillos de una ferretería. No hay ornamento en ello, dado que la analogía funciona como andamio provisional: sirve para sujetar el concepto mientras se instala el lenguaje preciso, y se retira cuando ese lenguaje ya sostiene por sí solo. Cada capítulo se abre con sus objetivos de aprendizaje y se cierra con una síntesis de ideas fuerza y con actividades que llevan lo estudiado al debate, al laboratorio y al análisis de casos, de manera que el estudiante pueda medir su avance sin depender por completo de la clase presencial. Esperamos que el libro cumpla el oficio modesto para el que fue concebido, el de acompañar el primer tramo de un camino que continúa mucho más allá de sus páginas.

**ÍNDICE**

**PREFACIO** ..... **i**
**ÍNDICE**..... **iii**
**ÍNDICE DE TABLA** ..... **i**
**ÍNDICE DE FIGURAS** ..... **ii**
**INTRODUCCIÓN**..... **iii**
**CAPÍTULO I** ..... **1**
**1 LA CÉLULA Y LA BASE DE LA VIDA** ..... **1**
1.1 Introducción al capítulo..... 1
1.2 Objetivos de aprendizaje ..... 1
1.3 Introducción a la biología..... 2
1.3.1 Una visión de la vida: características esenciales..... 2
1.3.2 Niveles de organización biológica ..... 7
1.3.3 Postulados y relevancia de la teoría celular ..... 11
1.2. Arquitectura y clasificación celular..... 14
1.3.4 Estructura básica de la célula y métodos de estudio ..... 14
1.3.5 Tipos de células: procariotas y eucariotas..... 19
1.3.6 Célula animal y célula vegetal: diferencias estructurales ..... 23
1.3. Orgánulos y compartimentos subcelulares..... 27
1.3.7 El núcleo, nucléolo y la organización del material genético..... 27
1.3.8 Orgánulos del citoplasma y el sistema de membranas internas . 30
1.3.9 . Citoesqueleto, citoplasma e inclusiones citoplasmáticas..... 33
1.4 Elementos de cierre..... 35
1.5 Actividades de aprendizaje ..... 36
**CAPÍTULO II**..... **38**
**2 QUÍMICA DE LA VIDA Y DINÁMICA DE MEMBRANAS 38**

2.1 Introducción al capítulo ..... 38
2.2 Objetivos de aprendizaje ..... 38
2.1. Composición química de los seres vivos ..... 39
2.2.1 Compuestos inorgánicos: el agua y las sales minerales ..... 39
2.2.2 Fundamentos de química: átomos, moléculas y enlaces químicos 42
2.2. Estructura de macromoléculas biológicas ..... 47
2.2.3 Carbohidratos y lípidos ..... 47
2.2.4 Proteínas ..... 52
2.2.5 Ácidos nucleicos (ADN y ARN): almacenamiento y expresión de la información genética ..... 57
2.3. Bioenergética celular ..... 60
2.2.6 Reacciones biológicas fundamentales en las células ..... 60
2.2.7 El rol vital de los compuestos ricos en ATP ..... 62
2.4. La membrana celular y sus mecanismos de transporte ..... 64
2.2.8 Estructura, funciones y permeabilidad selectiva de la membrana plasmática ..... 64
2.2.9 Transporte pasivo: difusión simple, difusión facilitada, osmosis y osmorregulación ..... 67
2.2.10 Transporte activo: exocitosis, endocitosis, fagocitosis y pinocitosis ..... 71
2.3 Elementos de cierre ..... 75
2.4 Actividades de aprendizaje ..... 76
**CAPÍTULO III ..... 77**
**3 METABOLISMO ENERGÉTICO Y RUTAS BIOQUÍMICAS ..... 77**
3.1 Introducción al capítulo ..... 77

3.2 Objetivos de aprendizaje ..... 77
3.1. Generalidades del metabolismo celular ..... 78
3.2.1 Definición, energía y finalidades del metabolismo ..... 78
3.2.2 Clasificación, fases y tipos: anabolismo y catabolismo ..... 82
3.2.3 Rutas metabólicas y tipos metabólicos primarios (autótrofos y heterótrofos) ..... 85
3.2. Respiración celular aeróbica ..... 88
3.2.4 Introducción y fases iniciales: glucólisis y formación de acetil CoA 89
3.2.5 . El ciclo del ácido cítrico (ciclo de Krebs) ..... 92
3.2.6 Cadena de transporte de electrones y quimiósmosis ..... 94
3.3. Metabolismo de bajo rendimiento energético ..... 97
3.2.7 Respiración anaeróbica ..... 97
3.2.8 Fermentación: alcohólica y del lactato ..... 100
3.4. Clasificaciones metabólicas específicas y ciclos biogeoquímicos 103
3.2.9 Tipos metabólicos: fotosintéticos, quimiosintéticos, litótrofos, organótrofos y fotolitótrofos ..... 103
3.2.10 El ciclo del nitrógeno: fijación, nitrificación y desnitrificación 108
3.3 Elementos de cierre ..... 113
3.4 Actividades de aprendizaje ..... 114
**CAPÍTULO IV ..... 116**
**4 CONTROL MOLECULAR Y APLICACIONES BIOQUÍMICAS ..... 116**
4.1 Introducción al capítulo ..... 116
4.2 Objetivos de aprendizaje ..... 116

4.1. Enzimas como catalizadores biológicos ..... 117
4.2.1 Naturaleza de las enzimas y su rol como catalizadores ..... 117
4.2.2 Actividad enzimática y cinética molecular ..... 121
4.2.3 Clasificación de enzimas y factores que modulan su función.. 125
4.2. Introducción a las aplicaciones tecnológicas de la biología .. 129
4.2.4 Principios básicos y la relación de la biología con las ciencias aplicadas ..... 129
4.2.5 Conceptos de enzimas inmovilizadas..... 132
4.3. Biotecnología y enzimas en la industria ..... 137
4.2.6 Aplicaciones de enzimas en la industria (énfasis en la alimentaria) ..... 137
4.2.7 Técnicas fundamentales de purificación de enzimas ..... 140
4.2.8 Producción y relevancia industrial de enzimas ..... 144
4.3 Elementos de cierre ..... 148
4.4 Actividades de aprendizaje ..... 149
**BIBLIOGRAFÍA ..... 150**

# ÍNDICE DE TABLA

**Tabla 1.Comparación entre célula procariota y eucariota** ..... 22
**Tabla 2.Tipos de moléculas de membrana** ..... 66
**Tabla 3.Características en el control de las concentraciones de soluto** .. 71
**Tabla 4.Tipos de Endocitosis:** ..... 74
**Tabla 5.Clasificación enzimática** ..... 126
**Tabla 6.Clasificación del método de inmovilización enzimática** ..... 134

## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.Pirámide biológica**.....3
**Figura 2.Flujo de energía entre varios organismos vivos** .....5
**Figura 3.niveles de organización biológica**.....9
**Figura 4.Hitos de la biología a través del tiempo** .....13
**Figura 5.Modelo mosaico fluido**.....15
**Figura 6.Diferencias entre microscopio óptico y electrónico**.....18
**Figura 7.Célula procariota**.....21
**Figura 8.Célula eucariota**.....23
**Figura 9.Comparación entre célula animal y vegetal**.....26
**Figura 10.Morfología del núcleo celular**.....28
**Figura 11.Sistema endomembrana** .....31
**Figura 12.Átomo**.....43
**Figura 13.Enlace covalente**.....45
**Figura 14.Bioquímica de la molécula de glucosa**.....49
**Figura 15.Estructura de un fosfolípido** .....51
**Figura 16.Enlace peptídico** .....54
**Figura 17. Transporte activo vs pasivo**.....68
**Figura 18.Catabolismo y anabolismo** .....81
**Figura 19.Fotosíntesis**.....87
**Figura 20.Cadena de transporte de electrones** .....95
**Figura 21.Modelo de llave y cerradura, hexoquinasa y glucosa** . 118
**Figura 22.Diagrama de energía, reacción catalizada vs no catalizada**.....120
**Figura 23.Gráfico de Michaelis-Menten**.....123
**Figura 24.Biorreactor industrial**.....140

# INTRODUCCIÓN

La enseñanza de la biología en los primeros ciclos de las carreras de ciencias químicas y de la salud arrastra una dificultad que pocas veces se enuncia: los contenidos suelen presentarse como compartimentos sucesivos, de modo que la arquitectura celular se estudia en un momento, la composición química en otro y el metabolismo en un tercero, sin que llegue a construirse el vínculo causal que los une. A esa fragmentación se añade la distancia entre el registro de los tratados internacionales de referencia, concebidos para un lector que ya maneja el vocabulario de la disciplina, y el punto de partida real de quien recién ingresa a la carrera de Bioquímica y Farmacia. De ahí que resulte frecuente un aprendizaje memorístico que se disuelve apenas concluida la evaluación y que deja sin cimiento a las asignaturas posteriores, en las cuales ese contenido reaparece, ya no como materia de examen, sino como herramienta de trabajo.

El presente texto se propone ofrecer un tratamiento continuo de esa materia, organizado como un solo argumento que avanza desde el átomo hasta la aplicación industrial y en el que cada capítulo prepara de manera explícita la pregunta que abrirá el siguiente. Junto con la exposición de los fundamentos, se busca que el estudiante reconozca la pertinencia profesional de lo que estudia, razón por la cual la cinética enzimática se vincula con el diseño de fármacos, la ósmosis con el comportamiento del eritrocito frente a soluciones de distinta tonicidad y la inmovilización de enzimas con procesos alimentarios de uso corriente. Se procura, asimismo, dotar al docente de un aparato didáctico

completo, con objetivos formulados en términos de desempeño, síntesis de cierre y actividades trasladables al aula o al laboratorio.

El capítulo I, La célula y la base de la vida, parte de la pregunta sobre qué distingue a un ser vivo y examina el orden, la homeostasis, el metabolismo y la evolución como propiedades emergentes; a continuación recorre la jerarquía de organización biológica desde el nivel atómico hasta la biosfera, reconstruye el itinerario histórico que va de las primeras observaciones de Robert Hooke a los postulados de la teoría celular, contrasta la arquitectura procariota con la eucariota y describe los orgánulos junto con el sistema de endomembranas, el citoesqueleto y las inclusiones citoplasmáticas. El capítulo II, Química de la vida y dinámica de membranas, desciende al plano molecular: analiza el agua y las sales minerales en tanto sustrato de toda reacción vital, repasa átomos, enlaces y las cuatro familias de macromoléculas, aborda la bioenergética celular y el papel del ATP, y concluye en la membrana plasmática, cuyo modelo de mosaico fluido explica la permeabilidad selectiva y los mecanismos de transporte pasivo y activo.

El capítulo III, Metabolismo energético y rutas bioquímicas, trata la administración de la energía celular e integra catabolismo y anabolismo en una red única, para luego desglosar la respiración aeróbica desde la glucólisis hasta la quimiósmosis mitocondrial, comparar su rendimiento con el de la respiración anaeróbica y el de la fermentación, y cerrar con las clasificaciones metabólicas y el ciclo del nitrógeno, donde la actividad microbiana se revela como sostén de un proceso planetario. El capítulo IV, Control molecular y aplicaciones bioquímicas, aborda las enzimas como catalizadores que reducen la energía de activación,

estudia su cinética mediante el modelo de Michaelis y Menten y los factores que modulan su actividad, y desemboca en la dimensión aplicada: enzimas inmovilizadas, usos industriales con énfasis en el sector alimentario, técnicas de purificación y proyección hacia la biología sintética.

Los cuatro capítulos comparten una misma arquitectura interna, con una introducción que anticipa el recorrido, objetivos de aprendizaje enunciados como capacidades verificables, un desarrollo apoyado en ilustraciones y tablas, una sección de elementos de cierre que condensa las ideas centrales y un bloque final de actividades. Cada uno incorpora además su propia bibliografía, de manera que pueda trabajarse de forma independiente sin perder el hilo del conjunto.

# CAPÍTULO I

# 1 LA CÉLULA Y LA BASE DE LA VIDA

## 1.1 Introducción al capítulo

El presente capítulo propone cruzar el umbral de lo macroscópico para adentrarse en la unidad fundamental de la existencia: la célula; partiendo de la pregunta esencial sobre qué define a un ser vivo (orden, homeostasis, metabolismo y evolución), emprenderemos un recorrido histórico y estructural que arranca en los primeros avistamientos de Robert Hooke y desemboca en la moderna teoría celular, con el propósito de desglosar cómo emerge la complejidad biológica de la organización jerárquica. Además del recorrido, se analizará la arquitectura de las células procariotas y eucariotas, para comprender de qué modo la vida logra funcionar como una "fábrica" de ingeniería perfecta gracias a la compartimentalización y a los orgánulos especializados.

## 1.2 Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- Discriminar las propiedades que emergen en los seres vivos, así como explicar qué importancia tienen la homeostasis y el metabolismo para la supervivencia biológica.
- Analizar la jerarquía de la organización biológica, desde el nivel atómico hasta la biosfera, comprendiendo la interdependencia entre niveles.

- Contrastar la arquitectura celular procariota y eucariota, identificando las diferencias estructurales clave y su impacto evolutivo.
- Correlacionar la estructura de los orgánulos celulares (núcleo, sistema de endomembranas, mitocondrias) con sus funciones específicas dentro de la fisiología celular.

## 1.3 Introducción a la biología

### *1.3.1 Una visión de la vida: características esenciales*

Cuando miramos el mundo que nos rodea como plantas, animales, hongos, bacterias o incluso un simple moho, sentimos que todos esos seres comparten algo fundamental: están “vivos”. Pero… ¿qué significa realmente estar vivo? A simple vista, sabemos que un perro que corre por el parque está vivo y que una roca en el camino no lo está. Sin embargo, en biología, la línea a veces puede ser difusa (piensa en los virus, por ejemplo). Para poner orden en este caos, los biólogos hemos acordado que no existe una única "chispa" que defina la vida, sino un conjunto de propiedades emergentes que deben cumplirse simultáneamente.

Imagina la vida no como un interruptor de encendido/apagado, sino como una lista de verificación de capacidades asombrosas. Según la literatura científica más actual, para considerar que algo está "vivo", debe cumplir con funciones específicas de orden, procesamiento de energía, regulación y evolución (Urry et al., 2021)

**Orden y organización jerárquica**

La vida no es aleatoria; es sumamente organizada. Los organismos vivos son estructuras químicas altamente ordenadas que no surgen por azar, sino que requieren una inversión de energía para mantener su estructura. La unidad fundamental de esta organización es la célula. Como señalan (Freeman, 2022), la teoría celular dicta que todos los organismos están compuestos por células y que estas provienen de células preexistentes.

Esta organización sigue una jerarquía: los átomos forman moléculas, las moléculas forman orgánulos y estos forman células. En organismos multicelulares, las células se agrupan en tejidos, órganos y sistemas. Esta complejidad estructural requiere una inversión constante de energía libre para contrarrestar la tendencia natural al desorden ( *Harper bioquímica ilustrada*, 2024)

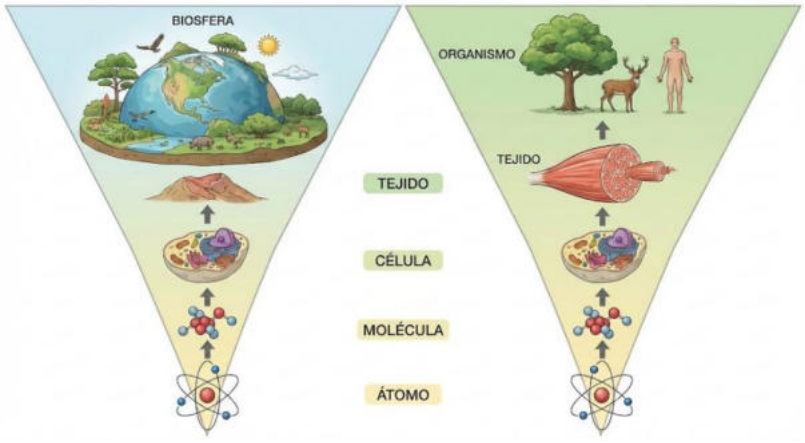



***Figura 1.Pirámide biológica***

***Fuente: los autores***

En la infografía se despliegan dos diagramas de flujo con forma de pirámides invertidas, ambos destinados a ilustrar la jerarquía de los niveles de organización biológica. Uno y otro gráfico arrancan en la base

inferior, más estrecha, con el nivel más fundamental, el "Átomo", y recurren a la par a flechas ascendentes que muestran la progresión hacia estructuras de complejidad creciente: "Molécula", "Célula" y "Tejido", acompañado cada uno de su ilustración representativa. La culminación de la jerarquía se ubica en la parte superior, más ancha: en tanto que la pirámide derecha se enfoca en el nivel de "Organismo" con ejemplos de vida vegetal y animal, la izquierda amplía la escala hasta la "Biosfera" y representa al planeta Tierra completo con sus diversos ecosistemas.

**Regulación (homeostasis)**

Imagina que tu cuerpo funciona como una casa dotada de aire acondicionado inteligente: cuando afuera hace mucho calor el sistema se enciende para enfriar el interior, y cuando hace frío se activa la calefacción, que es exactamente lo que realizan los seres vivos mediante un proceso llamado homeostasis.

La homeostasis es la capacidad de mantener un ambiente interno estable a pesar de las fluctuaciones drásticas en el entorno externo. Esto incluye regular la temperatura, el pH y la concentración de agua. Sin esta capacidad, las complejas reacciones químicas de la vida se detendrían, ya que la homeostasis no es un estado estático, sino un proceso dinámico esencial para la resiliencia evolutiva (Billman, 2020)

**Metabolismo: uso y transformación de energía**

Estar ordenado y mantener la homeostasis cuesta caro en términos energéticos. Por eso, todo ser vivo necesita "combustible". El metabolismo es la suma de todas las reacciones químicas que ocurren dentro de un organismo para sostener la vida. Permite que la vida se

mantenga en un estado estacionario dinámico, lejos del equilibrio termodinámico, gestionando la disipación de energía para imponer restricciones físicas que hacen posible el crecimiento y la versatilidad metabólica (Cossetto et al., 2025)

Los organismos toman energía de su entorno y la transforman, como ilustra la Figura 2. Dependiendo de cómo obtienen esta energía, los clasificamos en dos grandes grupos:

- Autótrofos: Como las plantas, que capturan la luz solar para crear su propio alimento.
- Heterótrofos: Como nosotros, que consumimos otros organismos para obtener energía química.

Esta transferencia de energía es fundamental, ya que "la vida es un sistema abierto que requiere un flujo constante de energía para contrarrestar la tendencia natural hacia el desorden o entropía" (Audesirk et al., 2020).

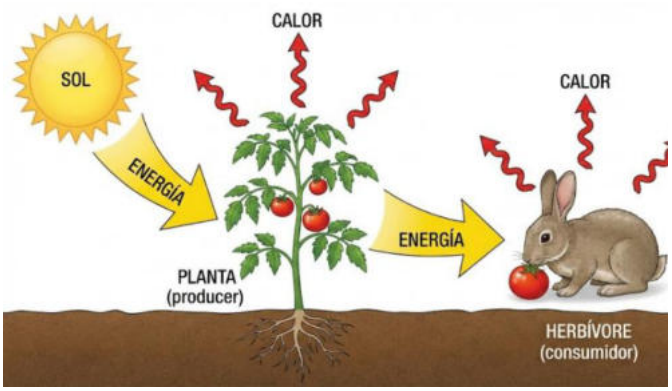



***Figura 2.Flujo de energía entre varios organismos vivos***

***Fuente: los autores.***

La imagen es una ilustración que diagramiza el flujo de energía en una cadena alimenticia simple, comienza con el "SOL" como fuente primaria, desde donde una gran flecha amarilla etiquetada "ENERGÍA" apunta hacia una "PLANTA (producer)", específicamente una planta de tomate con frutos rojos. Otra flecha amarilla de "ENERGÍA" conecta la planta con un "HERBÍVORE (consumidor)", representado por un conejo que come un tomate. Además, flechas onduladas rojas con la etiqueta "CALOR" emergen tanto de la planta como del conejo, indicando la pérdida de energía al ambiente.

**Respuesta a estímulos (irritabilidad)**

¿Alguna vez tocaste una olla caliente y retiraste la mano de forma instintiva? Eso es irritabilidad: los organismos vivos no son pasivos, sino que interactúan activamente con su entorno y perciben estímulos (luz, calor, sustancias químicas, sonido) a los que responden para sobrevivir.

Incluso las bacterias, que no tienen cerebro, responden a estímulos químicos acercándose a la comida o alejándose de toxinas, un proceso conocido como quimiotaxis. Esta capacidad de respuesta es vital para la supervivencia inmediata del individuo (Urry et al., 2021)

**Reproducción, crecimiento y desarrollo**

La vida engendra vida. Para que una especie perdure en el tiempo, sus individuos deben reproducirse. En este proceso, se transmite la información genética (ADN) a la siguiente generación.

- Reproducción: Puede ser asexual (clones exactos) o sexual (combinación genética).
- Crecimiento y Desarrollo: No solo nacemos, sino que cambiamos. Guiados por las instrucciones de nuestros genes, los organismos aumentan de tamaño y complejidad estructural a lo largo de su ciclo vital (Freeman, 2022)
- . Evolución y adaptación

Finalmente, esta es la característica que explica la diversidad de la vida. A nivel individual, un organismo no evoluciona; pero a nivel de población, la vida cambia a lo largo de generaciones.

Las mutaciones genéticas y la selección natural permiten que las poblaciones se adapten a entornos cambiantes. Las características que ofrecen una ventaja de supervivencia se transmiten con mayor frecuencia. Como resumen (Billman, 2020), la evolución es el hilo conductor que une a toda la biología, explicando tanto la unidad (rasgos compartidos) como la diversidad (adaptaciones específicas) de la vida en la Tierra.

### *1.3.2 Niveles de organización biológica*

Ciencia inmensa, la biología abarca desde lo increíblemente pequeño hasta lo planetario, de manera que, para estudiarla sin perdernos, los biólogos organizamos la vida en una jerarquía; imagina que dispones de una cámara con un lente de zoom súper potente: podrás alejarte hasta contemplar la Tierra entera desde el espacio o acercarte con el zoom hasta las moléculas que componen tu ADN.

Esta jerarquía no es solo una forma de clasificar cosas; nos ayuda a entender las propiedades emergentes. Este concepto clave significa que, en cada nuevo nivel de organización, surgen propiedades nuevas que no existían en el nivel anterior. Como explican (Urry et al., 2021), "el todo es mayor que la suma de sus partes". Por ejemplo, una neurona por sí sola no puede pensar, pero millones de ellas organizadas en un cerebro generan la conciencia.

A continuación, exploraremos estos niveles, partiendo desde lo más simple hasta lo más complejo.

**El nivel químico y celular: los cimientos**

Todo arranca en la química: en la base de la pirámide se encuentran los átomos, unidades mínimas de la materia que, al unirse mediante enlaces químicos, dan lugar a las moléculas, como el agua, las proteínas o el ADN.

Sin embargo, las moléculas no están vivas por sí solas. La magia ocurre cuando moléculas específicas se organizan para formar orgánulos (como el núcleo o las mitocondrias), que son los componentes funcionales de la célula. Finalmente, llegamos a la célula, que es la unidad fundamental de estructura y función de la vida. Como destacan (Billman, 2020), la célula es el nivel más bajo de organización que puede realizar todas las actividades requeridas para la vida.

**El nivel del organismo multicelular**

En organismos complejos como tú, las células no trabajan aisladas; forman equipos, según se aprecia en la Figura 3.

- Tejidos: Son grupos de células similares que trabajan juntas para realizar una función específica (por ejemplo, el tejido muscular).
- Órganos: Surgen de la organización de distintos tipos de tejidos para cumplir tareas de mayor complejidad, como sucede con el corazón, que reúne tejido muscular, nervioso y conectivo.
- Sistemas de Órganos: Es un equipo de órganos que cooperan para una función mayor (el sistema circulatorio).

Todo esto culmina en el Organismo: el individuo completo capaz de sobrevivir e interactuar con el medio (Mader & Windelspecht, 2022)

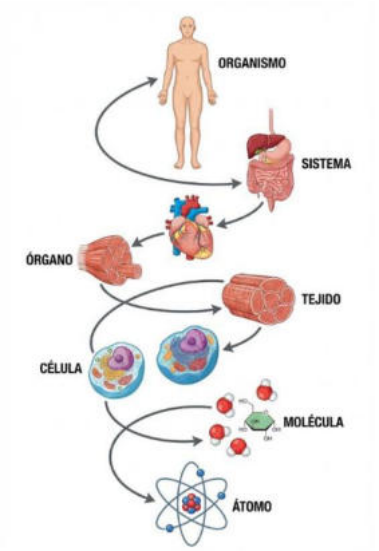



***Figura 3.niveles de organización biológica***

***Fuente: los autores***

La imagen representa la jerarquía ascendente de la complejidad biológica. Comenzando en la base con la unidad más fundamental, el "ÁTOMO", flechas curvas guían la transición a través de estructuras

progresivamente más complejas: varias "MOLÉCULAS" (incluyendo agua y glucosa), una "CÉLULA" animal detallado, secciones de "TEJIDO" muscular, un "ÓRGANO" (el corazón), y un "SISTEMA" corporal (el digestivo).

**El nivel ecológico: la vida en contexto**

La biología no se detiene en la piel del individuo, dado que los organismos interactúan entre sí y con su medio y configuran niveles de organización superiores:

- **Población:** Se denomina así al conjunto de individuos de una misma especie que habitan en una zona determinada (ej. una manada de lobos en un bosque).
- **Comunidad:** Se configura cuando poblaciones de distintas especies comparten un mismo lugar (ej. la interacción entre los lobos, los ciervos, los árboles y las bacterias del suelo).
- **Ecosistema:** Aquí sumamos el componente no vivo. Es la comunidad interactuando con su entorno físico (el agua, el suelo, el clima, la luz solar). Como señalan (Freeman, 2022), en este nivel estudiamos cómo fluye la energía y cómo circulan los nutrientes entre los seres vivos y el ambiente.
- **Biosfera:** Es el nivel final y más grande. Incluye todos los ecosistemas de la Tierra; es la suma de toda la vida en el planeta y los lugares donde existe, desde el fondo del océano hasta la atmósfera superior.

Entender estos niveles es crucial porque, en biología, para comprender cómo funciona el todo (la biosfera), a menudo necesitamos mirar las partes (las células), y viceversa.

### *1.3.3 Postulados y relevancia de la teoría celular*

Si la biología fuera un país, la Teoría Celular sería su Constitución. Es el conjunto de leyes fundamentales que rigen todo lo que conocemos sobre la vida. Pero no creas que estas leyes aparecieron de la noche a la mañana; fueron el resultado de más de dos siglos de detectives usando microscopios, discusiones acaloradas entre científicos y observaciones brillantes, recorrido que la Figura 4 ordena cronológicamente.

**Un poco de historia: el descubrimiento**

Todo comenzó en el siglo XVII, cuando un inglés curioso llamado Robert Hooke miró un trozo de corcho bajo un microscopio rudimentario y vio pequeñas "celdillas" parecidas a las habitaciones de un monasterio. Las llamó células. Poco después, el holandés Anton van Leeuwenhoek, un comerciante de telas con una habilidad increíble para pulir lentes, descubrió un mundo entero de "animálculos" (bacterias y protozoos) nadando en una gota de agua. ¡La vida no solo era lo que veíamos a simple vista! (Urry et al., 2021)

Sin embargo, tuvieron que pasar casi 200 años para que tres científicos alemanes unieran las piezas del rompecabezas y formularan lo que hoy conocemos como la Teoría Celular. La transición de la simple observación a la formulación de una teoría unificada fue un proceso intelectual complejo. Como describe Ribatti (2020) en su revisión histórica, este concepto no surgió de un solo descubrimiento aislado,

sino de una evolución de ideas sobre la organización de la materia viva que permitió unificar la botánica y la zoología bajo un mismo principio estructural (Ribatti, 2018).

**Los tres mandamientos (postulados clásicos)**

Podemos resumir la teoría celular en tres grandes pilares que, según autores como (Freeman, 2022), cambiaron para siempre nuestra forma de ver el mundo:

- **La unidad estructural:** Todos los organismos vivos están compuestos por una o más células. Ya sea una bacteria microscópica o un elefante africano, si lo miras de cerca, está hecho de células. Mathias Schleiden (botánico) y Theodor Schwann (zoólogo) se dieron cuenta en 1839 de que plantas y animales compartían esta misma arquitectura base.
- **La unidad funcional:** La célula es la unidad básica de la vida. Esto significa que la célula es la estructura más pequeña que puede realizar todas las funciones vitales: nutrirse, relacionarse y reproducirse. Nada más pequeño que una célula (como un orgánulo suelto) puede considerarse "vivo" por sí mismo.
- **La unidad de origen:** Toda célula proviene de otra célula preexistente. Este fue el golpe final a la antigua creencia de que la vida podía surgir de la nada (generación espontánea). Rudolf Virchow, en 1855, sentenció con su famosa frase en latín: "Omnis cellula e cellula". Esto implica que la vida es una cadena ininterrumpida que se remonta a la primera célula original (Audesirk et al., 2020)

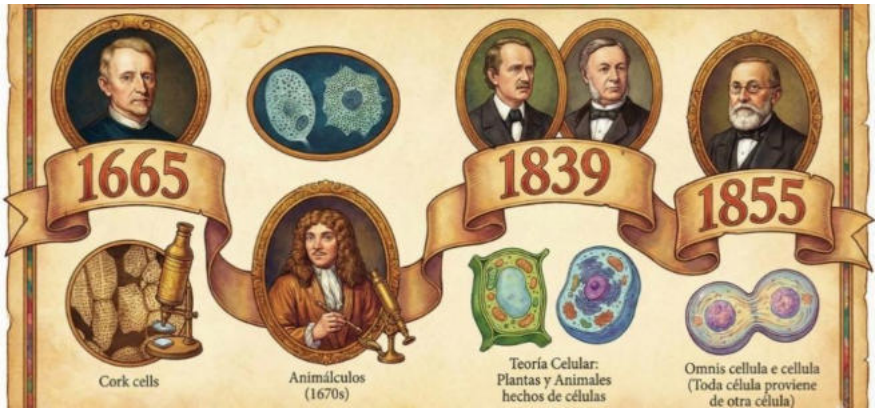



***Figura 4.Hitos de la biología a través del tiempo***

***Fuente: los autores.***

La imagen despliega una línea de tiempo ilustrada y de carácter educativo sobre la evolución histórica de la Teoría Celular, resuelta con un estilo visual de pergamino antiguo en el que se ordenan cronológicamente los hitos científicos clave; en concreto, el recorrido abre en 1665 de la mano de Robert Hooke y su observación de las celdillas en el corcho, al que sigue Antonie van Leeuwenhoek (hacia 1670) con su descubrimiento de los "animálculos". Avanza después hasta 1839, donde aparecen los retratos de Matthias Schleiden y Theodor Schwann, quienes establecieron que plantas y animales están compuestos por células, y el cierre llega en 1855 con Rudolf Virchow, autor del principio *"Omnis cellula e cellula"* (toda célula proviene de otra célula), lo cual se representa gráficamente mediante la división celular.

**La versión moderna: ¿qué hemos añadido?**

Gracias a la tecnología del siglo XXI, hemos ampliado estos postulados originales. La Teoría Celular Moderna añade detalles cruciales que los científicos del siglo XIX no podían ver (Billman, 2020):

- ADN: Las células contienen información hereditaria que se pasa a las células hijas durante la división.
- Energía: El flujo de energía (metabolismo y bioquímica) ocurre dentro de las células.
- Composición: Todas las células resultan en esencia iguales en su composición química, pues comparten los mismos tipos de proteínas, carbohidratos, lípidos y ácidos nucleicos.

**¿Por qué es relevante esto hoy?**

Quizás te preguntes: "¿Y esto a mí qué me importa?". La respuesta es: ¡Te importa para sobrevivir! La teoría celular es la base de la medicina moderna. Entender que el cáncer es una división celular descontrolada, o que los antibióticos funcionan atacando la pared celular de las bacterias (pero no las nuestras), es posible solo gracias a estos postulados. Sin la teoría celular, no tendríamos vacunas, tratamientos de fertilidad ni ingeniería de tejidos (Mader & Windelspecht, 2022)

## 1.2. Arquitectura y clasificación celular

### *1.3.4 Estructura básica de la célula y métodos de estudio*

La célula es increíble. Aunque algunas son tan pequeñas que cabrían millones en la punta de un alfiler, son sistemas de ingeniería biológica con una estructura fundamental que permite que la vida funcione.

Piensa en una célula como un apartamento estudio: tiene paredes, un espacio interior lleno de cosas y un centro de control. En esencia, todas las células, desde las bacterias más simples hasta las complejas células nerviosas, comparten tres componentes básicos indispensables (Urry et al., 2021):

## La membrana plasmática: la portera inteligente

Constituye la frontera, la piel que aísla el contenido interno de la célula (citosol) del entorno externo, y su composición principal, una doble capa de lípidos (grasas) y proteínas, tal como recoge la Figura 5, le confiere una característica fundamental: la permeabilidad selectiva.

La membrana no es solo una pared; es una portera inteligente que decide qué entra (nutrientes, agua, oxígeno) y qué sale (desechos). Esta función de control es vital para la homeostasis celular (Freeman, 2022).

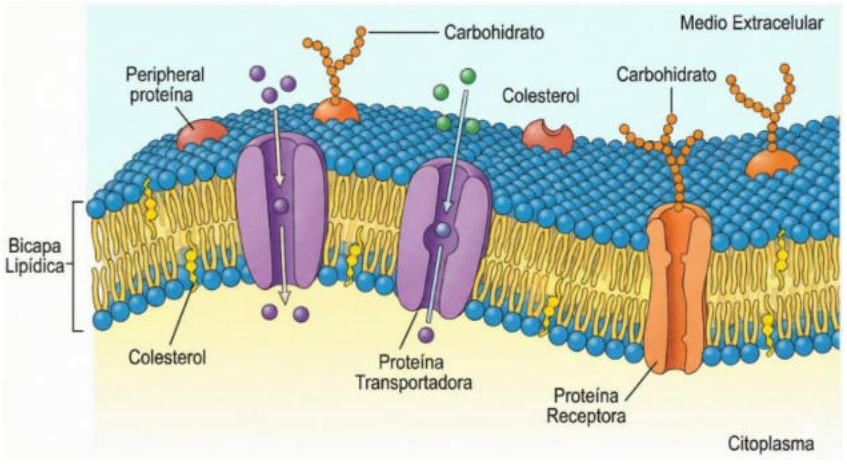



***Figura 5.Modelo mosaico fluido***

***Fuente: los autores***

Esta ilustración esquemática detalla la organización molecular de la membrana plasmática basada en el modelo de mosaico fluido. El componente estructural central es la bicapa lipídica, que actúa como una barrera selectiva separando el medio extracelular del citoplasma. Incrustadas en esta matriz se observan diversas macromoléculas funcionales: proteínas transportadoras (o de canal) que facilitan el paso de iones o moléculas, proteínas receptoras para la señalización celular y proteínas periféricas. Además, se identifican moléculas de colesterol intercaladas entre los fosfolípidos para modular la estabilidad y fluidez de la membrana, así como cadenas de carbohidratos en la superficie externa, esenciales para el reconocimiento celular.

**El citoplasma: el espacio de trabajo**

El citoplasma es la región que se encuentra entre la membrana plasmática y el centro de control (el núcleo o la región nuclear). Es como el interior de la fábrica donde ocurre toda la acción.

Se compone de dos partes esenciales:

- Citosol: Sustancia gelatinosa, acuosa y rica en sales en la cual transcurren buena parte de las reacciones químicas metabólicas, entre ellas la glucólisis.
- Orgánulos: Estructuras pequeñas y especializadas que cumplen funciones específicas (que veremos con detalle en 1.3).

**El material genético (ADN): el manual de instrucciones**

El Ácido Desoxirribonucleico (ADN) constituye la molécula maestra, pues alberga codificadas todas las instrucciones para construir la célula, dirigir sus actividades y, por último, reproducirse.

La forma en que se almacena este ADN es lo que nos permite clasificar a las células en los dos grandes grupos que veremos en el siguiente punto:

- En las células Procariotas, el ADN simplemente flota libremente en una región del citoplasma llamada nucleoide.
- En las células Eucariotas (las más complejas), el ADN está protegido y organizado dentro de una estructura envuelta en membrana: el Núcleo (Mader & Windelspecht, 2022)

**Métodos de estudio: cómo vemos lo invisible**

Para poder hablar de estas estructuras hubo que verlas antes, de ahí que el desarrollo de la biología celular esté íntimamente ligado al de los instrumentos que nos permiten superar los límites del ojo humano, cuyas prestaciones se contrastan en la Figura 6.

**El microscopio óptico (o de luz)**

Se trata del instrumento clásico de laboratorio, que se vale de lentes de vidrio y de luz visible para ampliar la imagen de las muestras y hace posible observar células enteras junto con algunos de sus orgánulos de mayor tamaño; aun cuando resulta útil, su límite de resolución deja fuera los detalles más finos, entre ellos la estructura de las proteínas o los virus.

**El microscopio electrónico**

Para ver los detalles ultrarrápidos (las nanoestructuras), los científicos no usan luz, sino haces de electrones. La longitud de onda de los electrones es mucho más corta que la de la luz visible, lo que permite un aumento de hasta 100,000 veces (Audesirk et al., 2020). Hay dos tipos principales:

- **ME de Transmisión (MET):** Los electrones atraviesan la muestra, revelando los detalles internos de los orgánulos.
- **ME de Barrido (MEB):** Los electrones rebotan en la superficie de la muestra, creando imágenes tridimensionales espectaculares de alta resolución de las estructuras externas.

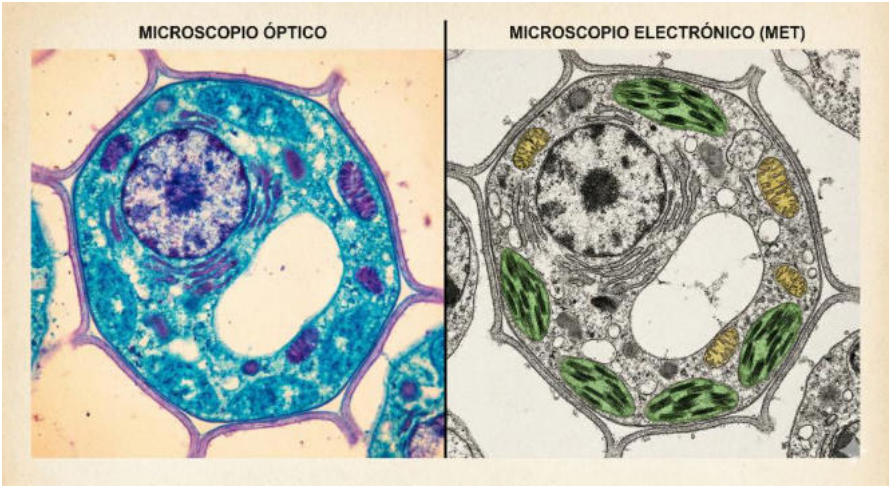



***Figura 6.Diferencias entre microscopio óptico y electrónico***

***Fuente: los autores***

En el lado izquierdo, la imagen de Microscopio Óptico presenta la célula teñida (en tonos azules y violetas) y permite identificar a menor aumento las estructuras generales, entre ellas la delimitación de la pared celular, además del núcleo y la gran vacuola central, mientras que a la derecha

la imagen captada con el Microscopio Electrónico de Transmisión (MET) revela una ultraestructura celular de nitidez muy superior. En esta micrografía electrónica los organelos se han resaltado de forma artificial para facilitar la docencia: en verde los cloroplastos, donde se aprecian las granas y tilacoides, y en amarillo las mitocondrias, de manera que queda demostrada la complejidad interna que la microscopía óptica no alcanza a resolver.

Según destacan (Jacquemet et al., 2020), la integración de la óptica avanzada con la inteligencia artificial ha transformado el microscopio, permitiendo hoy en día observar procesos dinámicos en células vivas con una resolución nanométrica. Esto permite no solo ver la célula, sino mapear su arquitectura interna con una precisión atómica antes impensable.

### *1.3.5 Tipos de células: procariotas y eucariotas*

Si la célula es la unidad de la vida, ¿por qué los seres vivos somos tan diferentes? La respuesta está en la antigüedad y la complejidad de la célula. A pesar de que toda la vida tiene un origen común, la evolución ha generado dos diseños arquitectónicos radicalmente distintos: las células procariotas (simples y ancestrales) y las eucariotas (complejas y modernas).

La principal diferencia, y la más importante, se centra en la presencia o ausencia de un núcleo que contenga el ADN (Alberts, 2021).

**El diseño sencillo: células procariotas**

Las procariotas, cuya arquitectura se esquematiza en la Figura 7, constituyen las células más antiguas y abundantes del planeta; el término “pro-” significa "antes" y “karyon” significa "núcleo", es decir, se trata de las células que ya existían antes de que se desarrollara el núcleo verdadero.

**Características clave:**

- **Ausencia de Núcleo:** El material genético (ADN) se concentra en una región del citoplasma denominada nucleoide, si bien carece de una membrana que lo rodee.
- **Simpleza Interna:** Carecen de orgánulos rodeados por membranas, entre ellos las mitocondrias, el retículo endoplasmático o el aparato de Golgi, y su única estructura membranosa es la plasmática
- **Tamaño Pequeño:** Generalmente son mucho más pequeñas que las eucariotas (típicamente entre 1 y 10 micrómetros).
- **Representantes:** Son las bacterias y las arqueas (los dos dominios de la vida procariota). Su estructura simple y su alta tasa de reproducción les permiten colonizar casi cualquier ambiente (Iwasa et al., 2020).

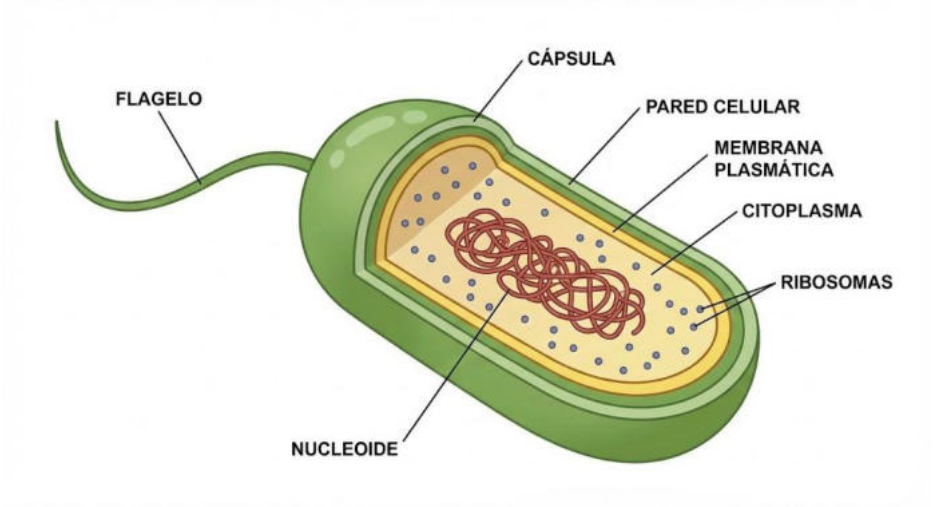



***Figura 7.Célula procariota***

***Fuente: los autores***

Esta imagen presenta un diagrama esquemático en corte longitudinal de una célula procariota típica (bacteriana), destacando su organización estructural fundamentalmente distinta a la de las células eucariotas.

## El diseño complejo: células eucariotas

Las eucariotas (del griego “eu-”, que significa "verdadero", y “karyon”, "núcleo") constituyen un avance evolutivo de peso, pues corresponden al diseño celular con el que están construidos animales, plantas, hongos y protistas; la Tabla 1 confronta rasgo por rasgo el diseño procariota y el eucariota.

## Características clave:

- Núcleo Verdadero: Su rasgo definitorio radica en un núcleo delimitado por una doble membrana, la envoltura nuclear, encargada de proteger y de ordenar el ADN.
- Compartimentalización (Orgánulos): Poseen un sistema de endomembranas (retículo endoplasmático, Golgi, lisosomas, etc.) y orgánulos generadores de energía (mitocondrias y cloroplastos) que dividen la célula en compartimentos. Esta división permite que las reacciones químicas incompatibles ocurran al mismo tiempo en diferentes lugares (Cooper, 2022)
- Tamaño Grande: Son significativamente más grandes y voluminosas que las procariotas (típicamente entre 10 y 100 micrómetros).
- Organización: Pueden ser organismos unicelulares muy complejos (como la ameba) o formar parte de organismos multicelulares altamente diferenciados (Iwasa et al., 2020)

***Tabla 1.Comparación entre célula procariota y eucariota***

| Característica | Célula Procariota | Célula Eucariota |
|---|---|---|
| **Tamaño** | Pequeña (1–10 μm) | Grande (10–100 μm) |
| **Material Genético** | Nucleoide (sin membrana) | Núcleo (rodeado por membrana) |
| **Orgánulos** | Ausentes (solo ribosomas) | Presentes y membranosos |
| **Ribosomas** | Pequeños (70S) | Grandes (80S) |
| **Ejemplos** | Bacterias y Arqueas | Animales, Plantas, Hongos, Protistas |

***Fuente: (Audesirk et al., 2020)***

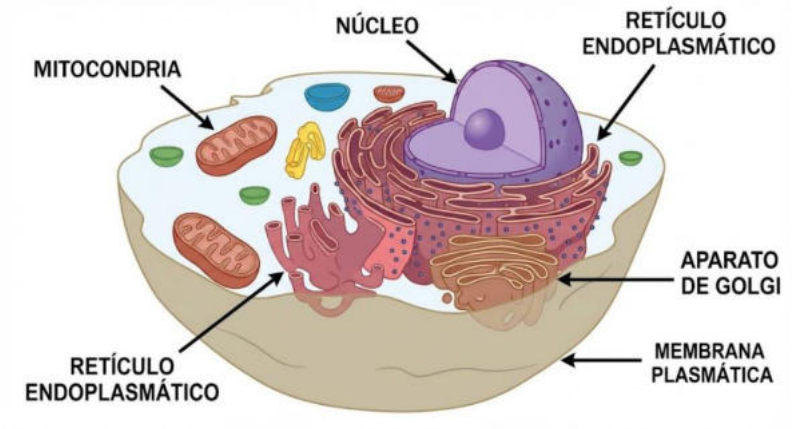



***Figura 8.Célula eucariota***

***Fuente: los autores***

Esta imagen presenta un diagrama esquemático en corte longitudinal de una célula eucariota típica (animal), destacando su organización estructural fundamentalmente distinta a la de las células eucariotas.

**Relevancia evolutiva**

La transición de procariota a eucariota fue el "salto de calidad" más grande en la historia de la vida. La teoría más aceptada para explicar la aparición de las mitocondrias y los cloroplastos en eucariotas es la Teoría Endosimbiótica. Esta teoría postula que estos orgánulos eran originalmente bacterias independientes que fueron engullidas por una célula ancestral mayor y formaron una relación de beneficio mutuo, un evento que marcó el inicio de la complejidad biológica que conocemos hoy (Alberts, 2021).

### *1.3.6 Célula animal y célula vegetal: diferencias estructurales*

Ya sabemos que todas las células complejas (eucariotas) comparten un núcleo y orgánulos membranosos, tal como muestra la Figura 8. Sin embargo, la vida multicelular se bifurcó en linajes con necesidades muy diferentes: los animales, que nos movemos buscando alimento (heterótrofos), y las plantas, que están fijas y fabrican su propio alimento (autótrofos).

Estas diferentes "estrategias de vida" se reflejan en la arquitectura celular. Aunque la célula animal y la vegetal comparten la membrana plasmática, el núcleo, las mitocondrias, el retículo endoplasmático y el aparato de Golgi, tienen tres diferencias estructurales mayores que las hacen únicas (Mason et al., 2020)

**Pared celular (solo vegetales)**

La célula vegetal posee una capa externa rígida y resistente, situada fuera de la membrana plasmática, conocida como la pared celular.

- **Función:** Proporciona un soporte estructural inmenso a la célula individual, lo que permite que la planta completa se mantenga erguida contra la gravedad (similar a un esqueleto externo). Además, protege a la célula de un hinchamiento excesivo debido a la absorción de agua (Cooper, 2022)
- **Composición:** En las plantas, está compuesta principalmente por el polisacárido celulosa.

La célula animal carece de pared celular. En su lugar, posee una matriz extracelular, una red de proteínas y carbohidratos que aporta soporte y permite la comunicación celular, pero que no es tan rígida.

- **Cloroplastos (solo vegetales)**

El cloroplasto es la razón por la que las plantas son verdes y pueden alimentarse del sol.

- Función: Son los sitios de la fotosíntesis, el proceso mediante el cual la energía luminosa se captura y se convierte en energía química (glucosa). Este es un orgánulo esencial para la vida autótrofa.
- Origen: Al igual que las mitocondrias, los cloroplastos tienen su propio ADN, lo que apoya la Teoría Endosimbiótica, sugiriendo que fueron bacterias fotosintéticas independientes en el pasado (Iwasa et al., 2020).

Las células animales no contienen cloroplastos y, por lo tanto, deben obtener su energía consumiendo otros organismos.

**Vacuola central de gran tamaño (principalmente vegetales)**

La vacuola central es un orgánulo membranoso gigante que domina el volumen de una célula vegetal madura, pudiendo ocupar hasta el 80-90% de su espacio.

- **Función:** Sirve como almacén central de agua, iones, nutrientes y desechos. Su función más importante es mantener la presión de turgencia, la presión interna del agua contra la pared celular. Esta presión es lo que hace que las plantas se mantengan firmes y turgentes; si la vacuola pierde agua, la planta se marchita (Urry et al., 2021).

- **Animales:** En las células animales las vacuolas resultan mucho menores y reciben el nombre de vesículas o vacuolas alimenticias, de función temporal y no estructural.

**Otras diferencias notables**

Lisosomas y Centríolos: Suelen ser prominentes en las células animales, donde los lisosomas actúan como "centros de reciclaje" y los centríolos ayudan en la división celular. Ambos son a menudo menos evidentes o están ausentes en las células vegetales superiores (Mason et al., 2020)

Forma: Las células vegetales suelen tener formas geométricas fijas (cuadradas o rectangulares) debido a su pared rígida, mientras que las células animales tienden a ser más flexibles y variables (esféricas, irregulares, etc.), contraste que la Figura 9 recoge en su conjunto.

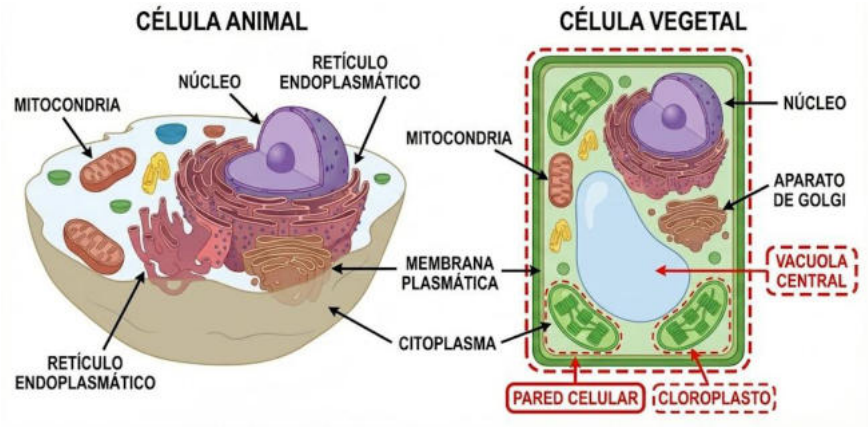



***Figura 9.Comparación entre célula animal y vegetal***

***Fuente: los autores.***

En esta ilustración comparativa se destacan las homologías y las diferencias morfológicas de fondo entre la célula animal y la vegetal:

ambas comparten la organización eucariota básica, con organelos comunes como núcleo, mitocondrias, retículo endoplasmático y aparato de Golgi. Por el contrario, la célula vegetal se singulariza por tres estructuras exclusivas señaladas en rojo, a saber, una pared celular rígida, responsable de su forma geométrica característica, más los cloroplastos destinados a la fotosíntesis y una vacuola central de gran tamaño que regula la turgencia, rasgos todos ausentes en la morfología más flexible de la célula animal.

## 1.3. Orgánulos y compartimentos subcelulares

### *1.3.7 El núcleo, nucléolo y la organización del material genético*

Si la célula es una fábrica, el núcleo es la oficina principal o la sala de servidores. Es el orgánulo más prominente de las células eucariotas y su función es doble y vital: albergar y proteger el material genético (ADN) y controlar la síntesis de proteínas en el citoplasma (Cooper, 2022)

**Estructura del núcleo**

El núcleo no es solo una esfera; es una estructura compleja y altamente organizada, según detalla la Figura 10:

- **Envoltura Nuclear:** Es una doble membrana que rodea el núcleo, separándolo del citoplasma. Esta membrana está salpicada de poros nucleares, que actúan como compuertas selectivas. Piénsalo como la aduana de la oficina central: solo permite la entrada de ciertas moléculas (como las proteínas que reparan el ADN) y la salida de otras (como el ARN, que lleva las instrucciones para la fabricación de proteínas) (Alberts, 2021)

- **Nucleoplasma:** Es el fluido gelatinoso que rellena el espacio dentro de la envoltura nuclear. Es similar al citosol, pero está especializado en el funcionamiento del material genético.
- **Lámina Nuclear:** Es una red fibrosa de proteínas que recubre el interior de la envoltura nuclear y proporciona soporte mecánico al núcleo, ayudando a mantener su forma.

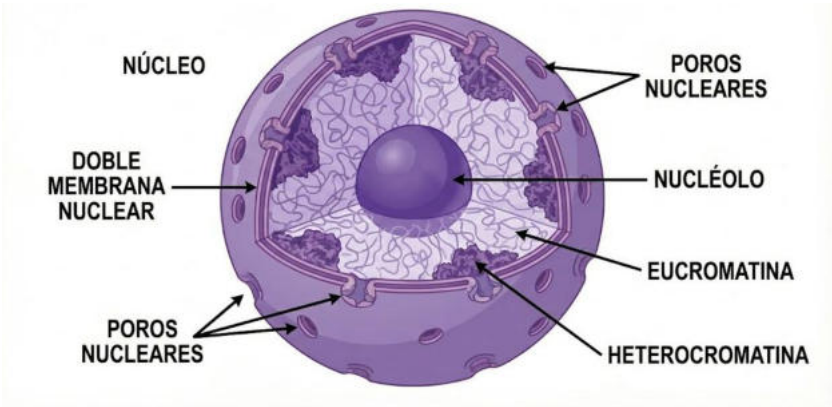



***Figura 10.Morfología del núcleo celular***

***Fuente: los autores***

La ultraestructura del núcleo celular, orgánulo rector de la actividad eucariota, queda detallada en esta lámina anatómica, donde el énfasis recae sobre la doble membrana nuclear que aísla el genoma, interrumpida de forma estratégica por poros nucleares que operan como compuertas selectivas del transporte nucleocitoplasmático. Dentro de la matriz nuclear se distingue el nucléolo, denso y esférico, responsable de la biogénesis ribosomal, al que rodea el material genético en dos estados de condensación funcional: la eucromatina se muestra dispersa y transcripcionalmente activa, mientras que la heterocromatina, compacta y silente, se adhiere sobre todo a la periferia interna.

**El material genético: cromatina y cromosomas**

El ADN no es un simple hilo suelto: dentro del núcleo aparece enrollado y condensado para encajar con orden, igual que una cuerda larguísima empaquetada con cuidado. A esa manera de organizarse el ADN se la denomina cromatina:

- **Cromatina:** Es el conjunto de ADN y proteínas (histonas, principalmente) en el que se aloja el genoma; mientras la célula no se divide, permanece en estado disperso, lo cual permite la lectura de los genes.
- **Cromosomas:** Cuando la célula se prepara para dividirse, la cromatina se compacta y se enrolla de forma extrema para formar estructuras visibles y densas llamadas cromosomas. Esta superorganización asegura que el material genético se reparta de forma precisa entre las dos células hijas (Griffiths et al., 2020)

La organización del material genético en el núcleo es esencial para controlar la expresión génica, es decir, qué genes se activan o desactivan en un momento dado, lo cual define la función de la célula (Urry et al., 2021).

- **El nucléolo: la fábrica de ribosomas**

Dentro del núcleo, existe una región densa y sin membrana propia llamada nucléolo. A pesar de su pequeño tamaño, su función es gigantesca:

- **Función:** Es el sitio de síntesis y ensamblaje de los ribosomas. Los ribosomas son las estructuras encargadas de traducir las

instrucciones del ARN en proteínas. Piensa en el nucléolo como la sub-fábrica que construye las máquinas (ribosomas) que la célula necesita para producir sus productos (proteínas) (Lodish et al., 2021)

Una vez ensamblados, los ribosomas migran del nucléolo al citoplasma a través de los poros nucleares para comenzar su trabajo en la síntesis proteica.

### *1.3.8 Orgánulos del citoplasma y el sistema de membranas internas*

Imagina que la célula es una ciudad muy concurrida. El citoplasma es todo el espacio que hay dentro de los muros (la membrana plasmática), lleno de una sustancia gelatinosa (el citosol) y muchas fábricas, centrales de energía y sistemas de transporte. Esas "instalaciones" son los orgánulos (o, si la célula es eucariota, organelos). Estos orgánulos están limitados por membranas, lo que permite que cada uno haga su trabajo sin interferir con los demás. A este conjunto de membranas que interconectan muchos de estos orgánulos se le llama el sistema de membranas internas (o sistema de endomembranas) (Alberts, 2021)

- **El sistema de endomembranas: fábricas y envíos**
- El trabajo de muchos orgánulos está coordinado, como si fueran una línea de ensamblaje. Este sistema, representado en la Figura 11, incluye el Retículo Endoplasmático, el Aparato de Golgi y los lisosomas.
- **Retículo Endoplasmático (RE):** Piensa en el RE como la red de túneles y áreas de producción de la célula. Es una red

de membranas y sacos aplanados (cisternas) interconectados (Lodish et al., 2021).Hay dos tipos:

- **RE Rugoso (RER):** Se llama así porque tiene ribosomas pegados en su superficie. Su trabajo principal es fabricar y modificar proteínas que están destinadas a ser secretadas fuera de la célula, a formar parte de las membranas o a residir en otros orgánulos. Una vez listas, las proteínas se empacan en vesículas para ser enviadas al siguiente destino (Cooper, 2022)

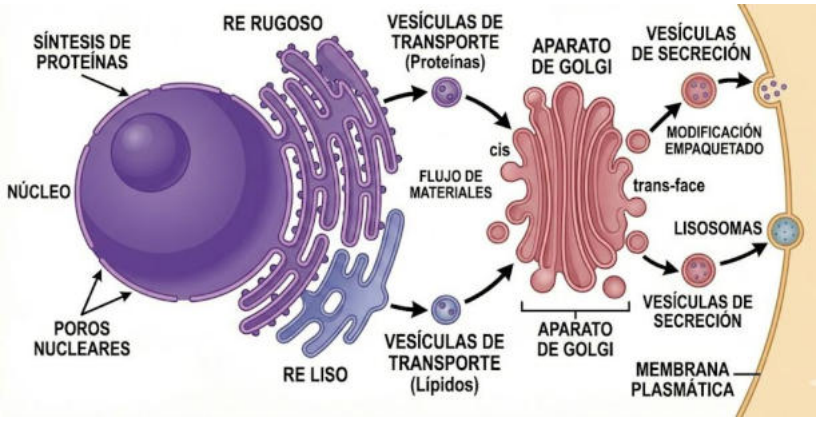



***Figura 11.Sistema endomembrana***

***Fuente: los autores***

El esquema recoge la dinámica del sistema de endomembranas y la ruta secretora celular, cuyo trazado arranca en el Retículo Endoplasmático (RE) y separa por función al RE Rugoso, donde ocurre la síntesis proteica, del RE Liso, responsable de la síntesis de lípidos. Los productos celulares viajan luego, mediante vesículas de transporte, hasta la cara cis del Aparato de Golgi, donde reciben modificaciones químicas y empaquetamiento; desde la cara trans emergen por último vesículas

nuevas con destinos específicos, en concreto vesículas de secreción que se fusionan con la membrana plasmática para verter su contenido al exterior (exocitosis) o bien la formación de lisosomas primarios cargados de enzimas hidrolíticas.

- **Aparato de Golgi:** Es la oficina de correos y aduanas de la célula. Se compone de sacos aplanados y apilados llamados cisternas, que parecen una pila de panqueques. Recibe las vesículas con proteínas y lípidos del RE, los modifica, los clasifica y les pone una "etiqueta de envío" para dirigirlos a su destino final dentro o fuera de la célula (Lodish et al., 2021)
- **Lisosomas:** Son los centros de reciclaje y digestión de la célula. Contienen poderosas enzimas digestivas (hidrolíticas) que trabajan en un ambiente ácido. Su función es descomponer los desechos celulares, las moléculas grandes de alimento y los orgánulos viejos o dañados. Si un lisosoma se rompe, las enzimas se inactivan debido al pH neutro del citosol, evitando que digieran la célula por completo (Cooper, 2022)

**Orgánulos de energía y síntesis no membranosos**

- **Mitocondrias:** ¡Las centrales de energía de la célula! Su principal tarea es generar la mayor parte del ATP (Adenosín Trifosfato), que es la "moneda" energética que la célula utiliza para realizar todas sus actividades. Este proceso se llama respiración celular. Las mitocondrias tienen una doble membrana (una externa y una interna muy plegada en crestas) y contienen su propio ADN y ribosomas, lo que apoya la Teoría Endosimbiótica (Alberts, 2021)

- **Peroxisomas:** Son pequeños orgánulos que contienen enzimas que ayudan a descomponer ácidos grasos y otras moléculas, produciendo peróxido de hidrógeno ($H_2O_2$) como subproducto. Para proteger la célula, también contienen la enzima catalasa, que rápidamente convierte este compuesto tóxico en agua ($H_2O$) y oxígeno ($O_2$) (Lodish et al., 2021)
- **Ribosomas**: Son estructuras no membranosas que actúan como las máquinas de ensamblaje de proteínas. Se encuentran libres en el citosol o unidos al Retículo Endoplasmático Rugoso. Su función esencial es llevar a cabo la síntesis de proteínas (traducción) siguiendo las instrucciones codificadas en el ARNm (Cooper, 2022)

### *1.3.9 . Citoesqueleto, citoplasma e inclusiones citoplasmáticas*

**El citoplasma: el escenario de la vida**

Como mencionamos, el citoplasma es el contenido total de la célula que se encuentra entre la membrana plasmática y el núcleo (en células eucariotas). Está compuesto por el citosol y los orgánulos.

- Citosol (o citoplasma soluble): Es el líquido gelatinoso, principalmente agua, donde están suspendidos los orgánulos. Es un medio acuoso rico en iones, sales, glucosa y muchas enzimas. En el citosol ocurren muchísimas reacciones metabólicas importantes, como la glucólisis (Cooper, 2022). La consistencia del citosol puede cambiar, volviéndose más fluida (estado sol) o más espesa (estado gel), lo que permite que la célula se mueva o cambie de forma.

## El citoesqueleto: los huesos y músculos de la célula

El citoesqueleto es una red compleja y dinámica de filamentos proteicos que atraviesa todo el citosol. Es como el esqueleto, los músculos y las vías férreas de la célula. No solo le da soporte estructural y mantiene la forma de la célula, sino que también permite el movimiento (tanto de la célula completa como de los orgánulos en su interior) y participa en la división celular (Alberts, 2021)

El citoesqueleto está formado por tres tipos principales de filamentos:

- Microtúbulos: Son los más gruesos. Se parecen a pequeños tubos huecos hechos de la proteína tubulina. Se originan en el centrosoma (el centro organizador de microtúbulos) y son esenciales para el transporte de orgánulos, el movimiento de cilios y flagelos, y la separación de los cromosomas durante la división celular (Mitosis y Meiosis) (Lodish et al., 2021)
- Filamentos Intermedios: Son de un grosor intermedio y están compuestos por diversas proteínas fibrosas (como la queratina en las células epiteliales). Su principal función es dar fuerza mecánica a la célula, actuando como anclas y resistiendo la tensión. Por ejemplo, mantienen la posición del núcleo y de otros orgánulos (Cooper, 2022)
- Microfilamentos (o Filamentos de Actina): Son los más delgados. Están formados por la proteína actina. Se concentran a menudo justo debajo de la membrana plasmática para darle soporte. Son cruciales para el movimiento celular (como el arrastre), la contracción muscular (junto con la miosina) y la citocinesis (división del citoplasma) (Alberts, 2021)

### Inclusiones citoplasmáticas: almacén de recursos

Las inclusiones citoplasmáticas son estructuras no permanentes y sin membrana que se encuentran en el citosol. Generalmente son reservas de nutrientes o productos de desecho que la célula ha almacenado para usarlos más tarde (Lodish et al., 2021)

- Ejemplos comunes incluyen:
- Gotas de lípidos: Almacenan grasas, especialmente abundantes en los adipocitos (células grasas).
- Gránulos de glucógeno: Almacenan el azúcar complejo glucógeno, que es la forma de energía de reserva rápida, muy común en las células del hígado y los músculos.
- Cristales: Depósitos de proteínas que se encuentran ocasionalmente.

## 1.4 Elementos de cierre

**La Teoría Celular:** Se consolida como la "Constitución" de la biología, estableciendo que la célula es la unidad estructural, funcional y de origen de todos los seres vivos.

- **Dualidad Estructural:** Dos grandes diseños bifurcan la vida, las procariotas (sin núcleo, ancestrales) y las eucariotas (con núcleo y orgánulos, complejas).

- **Especialización:** En eucariotas, el sistema de endomembranas (RE, Golgi, Lisosomas) permite la compartimentalización de funciones, optimizando procesos bioquímicos incompatibles.

- **Diferenciación:** Las células vegetales se distinguen de los animales por poseer pared celular, cloroplastos y una gran vacuola central.

Habiendo comprendido la *arquitectura* de la célula (sus muros, habitaciones y maquinaria), es imperativo preguntarse: ¿De qué materiales están hechas estas estructuras? ¿Qué combustible las impulsa? El siguiente capítulo desciende al nivel molecular para explorar la Química de la Vida, donde descubriremos cómo los átomos se ensamblan para formar las macromoléculas que acabamos de estudiar y cómo la membrana celular gestiona el tráfico de estos materiales.

## 1.5 Actividades de aprendizaje

- **Debate: "¿Están vivos los virus?":** A partir de los criterios de vida ya descritos (orden, metabolismo, homeostasis), argumentar a favor o en contra de que un virus se considere un ser vivo, con el contraste puesto en la definición de célula.

- **Modelado de la "Fábrica Celular":** Crear una infografía o un diagrama analógico que compare la célula con una ciudad o una fábrica, en el cual deben asignar roles (ej. Núcleo = Oficina central; Mitocondria = Central eléctrica) y justificar esa elección a partir de la función del orgánulo.

- **Cuadro Comparativo Taxonómico:** Elaborar una tabla pormenorizada que contraste Célula Procariota, Eucariota Animal y Eucariota Vegetal, con criterios que deben abarcar el

tamaño, la ubicación del ADN, la presencia de pared celular y el tipo de ribosomas.

- **Análisis de Micrografías:** Presentar imágenes obtenidas por microscopía óptica y electrónica (MET y MEB), ante las cuales el estudiante debe identificar qué tipo de microscopio se empleó y qué estructuras resultan visibles, con la justificación de por qué ciertos orgánulos solo se aprecian con el MET.

- **Ensayo sobre la Teoría Endosimbiótica:** Redactar un breve texto explicativo sobre el origen evolutivo de las mitocondrias y cloroplastos, citando las evidencias estructurales (propio ADN, doble membrana) que apoyan que fueron bacterias independientes.

# CAPÍTULO II

# 2 QUÍMICA DE LA VIDA Y DINÁMICA DE MEMBRANAS

## 2.1 Introducción al capítulo

Si la célula es el edificio de la vida, la química aporta los ladrillos y el cemento; exploraremos en este capítulo la composición molecular de los seres vivos, empezando por el agua, ese disolvente universal que hace posibles las reacciones vitales. Sumado a ello, analizaremos las cuatro familias de macromoléculas, carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos, que levantan la estructura celular y almacenan su información, y por último nos centraremos en la membrana plasmática, frontera dinámica que defiende la homeostasis celular frente al caos del entorno mediante transporte pasivo y activo.

## 2.2 Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- Evaluar las propiedades físico-químicas del agua y las sales minerales, junto al papel crítico que cumplen en la solvatación y regulación del pH biológico.
- Clasificar las macromoléculas biológicas (carbohidratos, lípidos, proteínas, ácidos nucleicos) según sus monómeros, tipos de enlace y funciones biológicas.
- Explicar el modelo de mosaico fluido de la membrana plasmática y cómo su naturaleza anfipática determina su permeabilidad selectiva.

- Diferenciar los mecanismos del transporte celular (difusión, ósmosis, transporte activo, endocitosis), con identificación del gasto energético y del uso de proteínas transportadoras que corresponde a cada caso.

## 2.1. Composición química de los seres vivos

### *2.2.1 Compuestos inorgánicos: el agua y las sales minerales*

Imagina que la célula es como una pequeña ciudad superactiva. Para que esta ciudad funcione, necesita dos cosas fundamentales: una autopista para que todo circule y materiales de construcción especiales. Esas "autopistas" y "materiales" son el agua y las sales minerales, dos compuestos inorgánicos que son la base de la vida.

**El agua: el disolvente universal y la base de todo**

El agua ($H_2O$) no es solo una bebida refrescante; es la molécula más abundante en cualquier ser vivo, constituyendo entre el 50% y el 95% del peso de un organismo (Raymond & Morrow, 2021) ¡Es la verdadera protagonista de la Biología!

**¿Por qué es tan especial?** La molécula de agua tiene una estructura particular que la convierte en una molécula dipolar. Esto quiere decir que, aunque no tiene carga eléctrica neta (es neutra), funciona como un pequeño imán: tiene una zona ligeramente positiva (donde están los hidrógenos) y una ligeramente negativa (donde está el oxígeno). Esta característica le permite formar puentes de hidrógeno con otras moléculas (Raymond & Morrow, 2021)

## Funciones del agua en la célula

- **Disolvente Universal:** Su naturaleza dipolar hace que el agua sea capaz de disolver una enorme variedad de sustancias, como iones (sales) y moléculas polares (azúcares o proteínas). Al rodear estas sustancias y separarlas, crea lo que llamamos una **solución**, el medio perfecto para que ocurran las reacciones químicas de la célula (Pouliquen, 2024). Piensa en ella como el "caldo" de la vida.
- **Transporte:** Como es un gran disolvente, el agua se encarga de transportar los **nutrientes** (como la glucosa y los minerales) a todas las células y de llevarse los **desechos** (como el amonio) para que puedan ser eliminados. La sangre, por ejemplo, es principalmente agua (Pouliquen, 2024).
- **Termorregulación:** El agua tiene una alta capacidad para absorber calor sin cambiar mucho su propia temperatura. Esto es vital para los seres vivos, ya que actúa como un **amortiguador térmico**, ayudándonos a mantener una **temperatura corporal constante** a pesar de los cambios en el ambiente o del calor generado por el metabolismo (Raymond & Morrow, 2021). ¡Es nuestro aire acondicionado natural!

## Las sales minerales: los iones que dan equilibrio

Además del agua, las células y los fluidos corporales contienen sales minerales, que son compuestos inorgánicos esenciales. Las obtenemos principalmente a través de la alimentación, ya que nuestro cuerpo no puede producirlas (Razzaque & Wimalawansa, 2025)

¿Cómo se encuentran? Las sales minerales se presentan de dos formas principales en los seres vivos:

- **Precipitadas (no solubles):** Forman estructuras sólidas que dan soporte y protección. El ejemplo más claro es el fosfato de calcio y el carbonato cálcico, que son los que dan la rigidez a nuestros huesos y dientes (Razzaque & Wimalawansa, 2025)
- **Disueltas (ionizadas):** Cuando las sales como el cloruro de sodio (NaCl) se disuelven en agua, se separan en partículas con carga eléctrica llamadas iones. Los iones positivos se llaman cationes (como $Na^+$, $K^+$, $Ca^{2+}$) y los iones negativos, aniones (como $Cl^-$, $PO_4^{3-}$) (Raymond & Morrow, 2021)
- Funciones Vitales Los iones disueltos cumplen funciones cruciales:
- **Regulación del pH:** Actúan como sistemas amortiguadores o buffer, ayudando a que el nivel de acidez (pH) de los fluidos biológicos se mantenga constante, algo esencial para que las proteínas puedan trabajar (Raymond & Morrow, 2021)
- Equilibrio Hídrico y Osmótico: El sodio ($Na^+$) y el potasio ($K^+$) son los encargados de mantener la cantidad adecuada de agua dentro y fuera de la célula, un proceso que estudiaremos como ósmosis (Razzaque & Wimalawansa, 2025)
- **Funciones Específicas:** Ciertos iones son necesarios para procesos específicos de la vida. Por ejemplo, el $Ca^{2+}$ es fundamental para la contracción muscular y la coagulación de la sangre, el $Fe^{2+}$ es parte de la hemoglobina (que transporta

oxígeno), y el $Mg^{2+}$ participa en la activación de muchas enzimas (*Minerales en la dieta*, s. f.)

Al entender el rol del agua y de las sales minerales, queda claro que estos compuestos inorgánicos no son simples rellenos, sino la infraestructura química sin la cual la célula no podría existir.

### *2.2.2 Fundamentos de química: átomos, moléculas y enlaces químicos*

La célula, aunque parezca una entidad compleja, está construida a partir de materiales muy pequeños. Para entender cómo se arma la vida, debemos mirar a nivel atómico (Figura 12).

**Átomos y moléculas: la unidad mínima de la materia**

Imagina que estás construyendo una pared con bloques de LEGO.

- El Átomo - El Bloque de Construcción: Un átomo es la unidad más pequeña de la materia que conserva las propiedades de un elemento químico (por ejemplo, el átomo de Carbono (C), de Oxígeno (O) o de Hidrógeno (H)). Un átomo está compuesto por un núcleo (donde se encuentran los protones con carga positiva y los neutrones sin carga) rodeado por una nube de electrones con carga negativa (Chang & Overby, 2020).

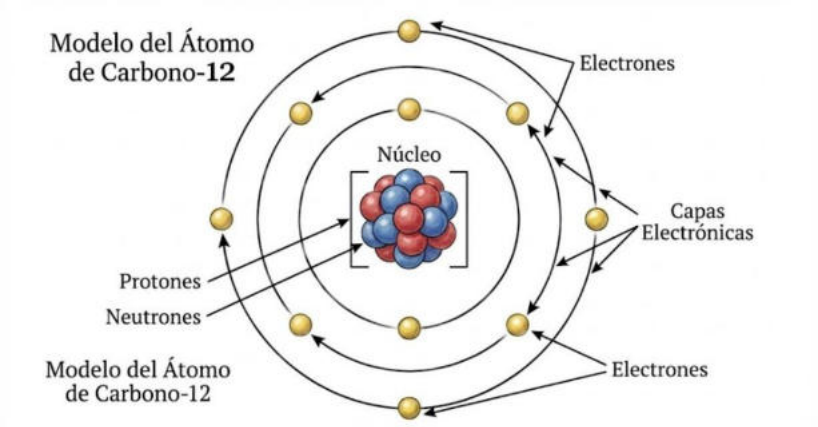



***Figura 12.Átomo***

***Fuente: los autores***

Esta ilustración representa esquemáticamente la estructura del Carbono-12 (12C) utilizando el modelo atómico de Bohr. En el centro reside el núcleo, conformado por 6 protones y 6 neutrones, partículas subatómicas responsables de la masa atómica y la estabilidad nuclear. Orbitando alrededor, se visualizan 6 electrones distribuidos en niveles de energía cuantizados o capas electrónicas: la capa interna (n=1) está completa con 2 electrones, mientras que la capa externa (n=2) contiene 4 electrones de valencia. Esta configuración electrónica explica la tetravalencia del carbono, característica fundamental que le permite formar cuatro enlaces covalentes y constituir el esqueleto de todas las biomoléculas orgánicas.

- **Molécula -** La Combinación de bloques: Una molécula se forma cuando dos o más átomos se unen de forma estable. Por ejemplo, cuando dos átomos de Hidrógeno se unen con uno de Oxígeno, forman la molécula de agua ($H_2O$). Las moléculas pueden ser muy simples (como el oxígeno gaseoso, $O_2$) o muy complejas

(como la glucosa, $C_6H_{12}O_6$), pero todas se forman por la combinación de estos bloques atómicos (Chang & Overby, 2020).

**Enlaces químicos: los pegamentos de la vida**

¿Qué mantiene a los átomos unidos para formar moléculas? La respuesta es la energía almacenada en los enlaces químicos. Un enlace se forma porque los átomos buscan alcanzar la mayor estabilidad posible, generalmente completando su capa más externa de electrones, lo que se conoce como la regla del octeto (Chang & Overby, 2020).

Existen dos tipos principales de enlaces fuertes que forman las moléculas biológicas y dos tipos de interacciones más débiles, pero igual de importantes:

**Enlaces intramoleculares (fuertes)**

Estos enlaces son muy estables y requieren mucha energía para romperse. Son los que mantienen a los átomos juntos dentro de una molécula.

- **Enlace covalente:** Es el "pegamento" más importante en Biología. Ocurre cuando dos átomos comparten uno o más pares de electrones para completar sus capas externas, según se aprecia en la Figura 13.

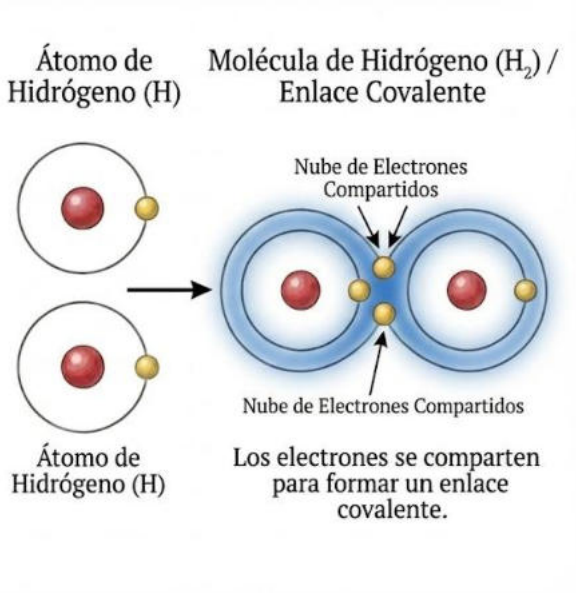



***Figura 13.Enlace covalente***

***Fuente: los autores***

La formación de un enlace covalente (específicamente apolar) queda esquematizada en esta ilustración, que toma como modelo la génesis de una molécula de hidrógeno diatómico (H2). A la izquierda aparecen dos átomos independientes de Hidrógeno (H), inestables cada uno, con un solo electrón de valencia en órbita alrededor de su núcleo, mientras que la flecha de reacción señala la transición hacia un estado energéticamente menor, a la derecha, donde se produce el solapamiento de los orbitales atómicos. De ahí que se forme una nube de electrones compartidos, en la que el par de electrones gira alrededor de ambos núcleos de manera simultánea, mecanismo que permite a cada átomo alcanzar una configuración electrónica estable (isoelectrónica con el Helio) y que constituye la fuerza fundamental del mantenimiento de la integridad molecular.

- **Enlace Iónico:** Se produce cuando un átomo **cede** por completo un electrón a otro, de manera que quien cede queda con carga positiva (**catión**) y quien recibe, con carga negativa (**anión**); la atracción eléctrica entre esas cargas opuestas es lo que los mantiene unidos.

**Ejemplo biológico:** Las sales minerales como el cloruro de sodio ($NaCl$) están unidas por enlaces iónicos.

**Interacciones intermoleculares (débiles)**

Individualmente débiles, estos enlaces resultan esenciales por su acción conjunta, ya sea para dar forma tridimensional a las macromoléculas (como las proteínas y el ADN), ya sea para hacer posible el reconocimiento molecular.

- **Puentes de Hidrógeno:** Como vimos en el agua, este es un tipo especial de atracción que se forma cuando un átomo de Hidrógeno, unido covalentemente a un átomo muy electronegativo (como O o N), es atraído por otro átomo electronegativo cercano.
- Rol crucial: Son esenciales para la doble hélice del ADN y para estabilizar la forma compleja de las proteínas (Chang & Overby, 2020)
- **Interacciones de van der Waals e Hidrofóbicas:** Son atracciones muy débiles y de corto alcance que ayudan a las moléculas grandes a "empaquetarse" de la forma correcta. Las interacciones hidrofóbicas son vitales para que las grasas y aceites se agrupen y formen las membranas celulares (Chang & Overby, 2020)

Entender estos enlaces es clave, ya que la función biológica de una molécula depende completamente de su estructura (la forma en que sus átomos están unidos) y de su forma (la disposición que le dan los enlaces débiles).

## 2.2. Estructura de macromoléculas biológicas

Antes de entrar en materia, imagina que tienes una caja gigante de piezas de LEGO. Con esas mismas piezas puedes construir una casa, un coche o un avión. En la célula ocurre lo mismo: utilizando pequeñas unidades químicas llamadas monómeros (los ladrillos), la vida construye estructuras gigantes y complejas llamadas polímeros o macromoléculas.

A continuación, vamos a explorar dos de los "materiales de construcción" más importantes: los que nos dan energía inmediata y los que forman nuestras fronteras.

### *2.2.3 Carbohidratos y lípidos*

Basta con revisar la etiqueta nutricional de tu snack favorito para encontrar estos dos nombres por todas partes, aunque en términos biológicos son mucho más que simples calorías: identidad, estructura y reservas de emergencia.

#### Carbohidratos: el combustible y el soporte

Los carbohidratos (o glúcidos) se componen de carbono, hidrógeno y oxígeno; puedes pensarlos como la "gasolina" de la vida, aunque también hacen de "andamios" estructurales.

**Monosacáridos: La Energía Rápida.** Son los azúcares de estructura más simple, y el protagonista indiscutible es la glucosa ($C_6H_{12}O_6$), tan vital que las células de tu cerebro se niegan a emplear otro combustible en condiciones normales.

Como explican Nelson y Cox (2021), la glucosa es la fuente central de energía para la mayoría de los organismos; es el "billete dorado" que las células canjean por ATP mediante la respiración celular. Otros monosacáridos importantes son la fructosa (el azúcar de las frutas) y la ribosa (que veremos luego formando parte del ADN).

**Polisacáridos: Almacén y Estructura**. Cuando unimos cientos o miles de monosacáridos, formamos polisacáridos, tal como recoge la Figura 14. Aquí la función cambia dependiendo de cómo se unan las piezas:

Almacenamiento de Energía:

- En Plantas (Almidón): Las plantas guardan su exceso de glucosa como almidón (piensa en una papa o en el arroz). Es su despensa para tiempos difíciles (Urry et al., 2021)

- En Animales (Glucógeno): Nosotros no guardamos almidón, guardamos glucógeno. Se almacena principalmente en el hígado y los músculos. Es una reserva de energía de "acceso rápido" que dura aproximadamente un día si no comes (Abali et al., 2022)

- Soporte estructural:

- Celulosa: Es el componente principal de las paredes celulares de las plantas. Es tan resistente que los humanos no podemos

digerirla (por eso la llamamos "fibra"), pero es esencial para la salud intestinal (Urry et al., 2021)

- Quitina: Es el material duro que forma el exoesqueleto de los insectos y las paredes celulares de los hongos.

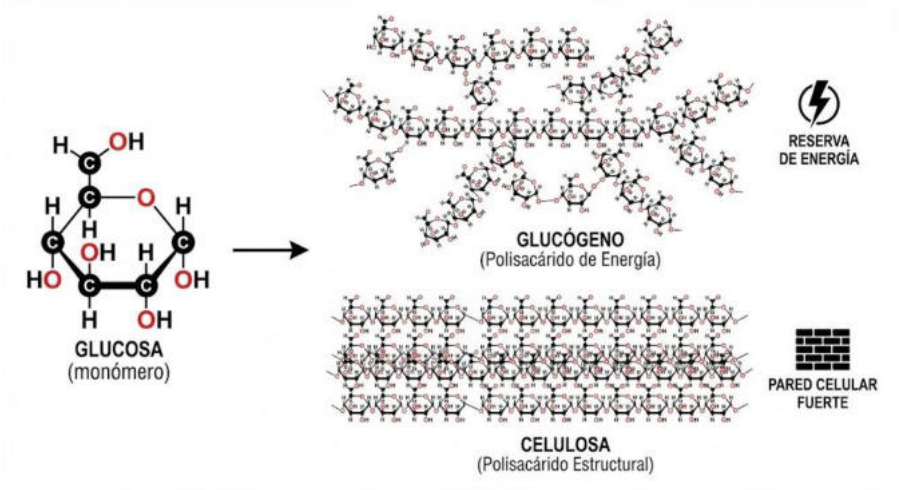



***Figura 14.Bioquímica de la molécula de glucosa***

***Fuente: los autores***

La imagen pone de relieve la importancia bioquímica de la glucosa como unidad monomérica central: su estructura molecular, representada a la izquierda, es el bloque de construcción de dos polisacáridos con funciones biológicas opuestas, el Glucógeno (arriba), de ramificación intensa e idónea para la reserva de energía y su rápida movilización (típicamente en animales), mientras que la Celulosa (abajo) debe a su disposición lineal y compacta la resistencia mecánica que exige la función estructural en la pared celular vegetal.

**Lípidos: los que odian el agua (hidrofóbicos)**

Los lípidos son un grupo muy diverso de moléculas que comparten una característica clave: son hidrofóbicos. Esto significa que no se mezclan con el agua (como cuando intentas mezclar aceite y vinagre). Esta "fobia" al agua es, irónicamente, lo que permite que nuestras células existan en un medio acuoso sin disolverse.

Existen tres tipos principales que debes conocer para entender cómo funciona tu cuerpo:

**Grasas (triglicéridos): la batería de larga** Duración Si los carbohidratos son dinero en efectivo (se gasta rápido), las grasas son una cuenta de ahorros a plazo fijo. Un triglicérido está formado por una molécula de glicerol unida a tres ácidos grasos.

Son la forma más eficiente de almacenar energía. Un gramo de grasa almacena más del doble de energía que un gramo de carbohidratos, lo que permite a los animales móviles llevar sus reservas de energía sin cargar demasiado peso extra (Urry et al., 2021)

Además de energía, las grasas nos aíslan del frío (como la capa de grasa de una ballena) y protegen nuestros órganos vitales de los golpes (Abali et al., 2022)

**Fosfolípidos: los arquitectos de membranas** Estas moléculas son fascinantes porque tienen una "doble personalidad" (son anfipáticas):

- Tienen una cabeza que ama el agua (hidrófila).
- Tienen dos colas que odian el agua (hidrofóbicas).

Cuando los pones en agua se organizan solos en una doble capa, como muestra la Figura 15, con las colas escondidas hacia el interior y las cabezas expuestas al medio acuoso, de ahí que esa autoorganización dé lugar a la bicapa lipídica, base estructural de todas las membranas celulares; sin esa propiedad química de los fosfolípidos, según Alberts et al. (2022), las células no podrían sostener un ambiente interno distinto del externo.

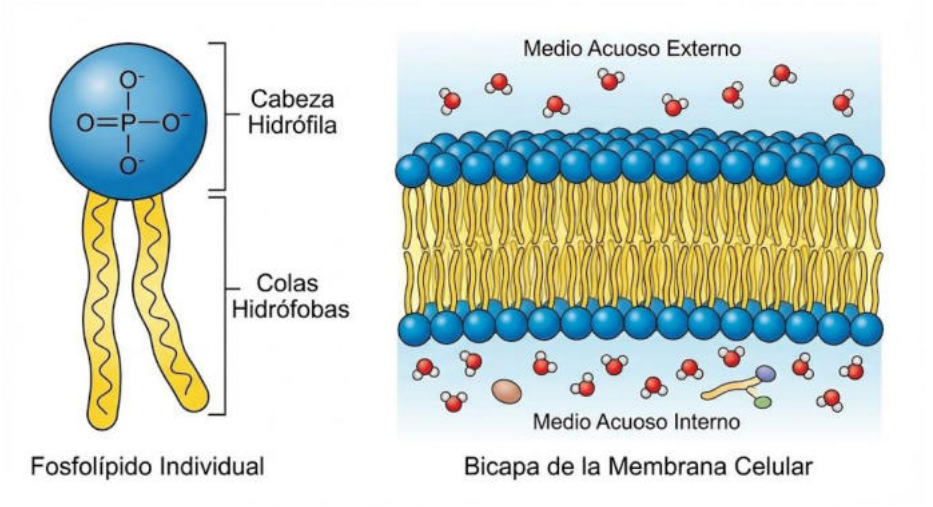



***Figura 15.Estructura de un fosfolípido***

***Fuente: los autores***

Esta lámina didáctica explica la naturaleza anfipática de los fosfolípidos y su rol fundamental en la arquitectura celular. A la izquierda, se desglosa la estructura del fosfolípido individual, distinguiendo una cabeza hidrófila polar (que contiene el grupo fosfato) y dos colas hidrófobas apolares. A la derecha, se demuestra cómo esta dualidad química impulsa su autoensamblaje termodinámico en una bicapa lipídica: las cabezas polares se orientan hacia el medio acuoso (externo

e interno), protegiendo a las colas apolares que quedan confinadas en el interior de la estructura, estableciendo así una barrera selectiva esencial para la vida.

Esteroides: señales y fluidez A diferencia de las grasas, los esteroides tienen una estructura de cuatro anillos fusionados de carbono. El más famoso (y a veces injustamente temido) es el colesterol.

Cumple una función vital ya que es esencial para mantener la fluidez de la membrana celular y es la "materia prima" para fabricar hormonas sexuales como la testosterona y el estrógeno (Nelson & Cox, 2021).

### *2.2.4 Proteínas*

Si la célula fuera una ciudad futurista, los carbohidratos serían la central eléctrica y los lípidos serían los muros de los edificios. Pero, ¿quién hace el trabajo real? ¿Quién construye, transporta, defiende y repara? Las proteínas.

Son las "obreras" moleculares más versátiles y sofisticadas de la vida. De hecho, tu ADN es básicamente un manual de instrucciones gigante para fabricar proteínas, porque ellas son las que ejecutan las órdenes genéticas.

**Los ladrillos: aminoácidos**

Imagina que tienes un collar de perlas. Cada perla es una unidad individual llamada aminoácido. Aunque existen cientos de aminoácidos en la naturaleza, todos los seres vivos, desde una bacteria hasta un

elefante, utilizamos el mismo "alfabeto" de solo 20 aminoácidos estándar para construir nuestras proteínas (Alberts et al., 2022)

Cada aminoácido tiene una estructura fundamental idéntica, como un chasis de coche estándar, pero con un accesorio único que le da su personalidad:

1. Un grupo Amino (-NH2): La parte básica.
2. Un grupo Carboxilo (-COOH): La parte ácida.
3. Un grupo R (Cadena Lateral): Aquí está la magia. El grupo R es la "matrícula" variable. Puede ser simple como un átomo de hidrógeno (glicina) o complejo y con carga eléctrica. Esta pequeña diferencia química determina si el aminoácido amará el agua, la odiará, o si será ácido o básico (Lieberman & Peet, 2023)

**El enlace peptídico: el cemento**

Para unir estos ladrillos, la célula realiza una reacción química llamada síntesis por deshidratación. El grupo carboxilo de un aminoácido se une al grupo amino del siguiente, liberando una molécula de agua. Este enlace covalente, fuerte y rígido, se llama enlace peptídico, y la Figura 16 detalla su formación.

Una cadena corta de aminoácidos es un péptido; cuando la cadena se hace larga y compleja, hablamos de un polipéptido (Nelson & Cox, 2021).

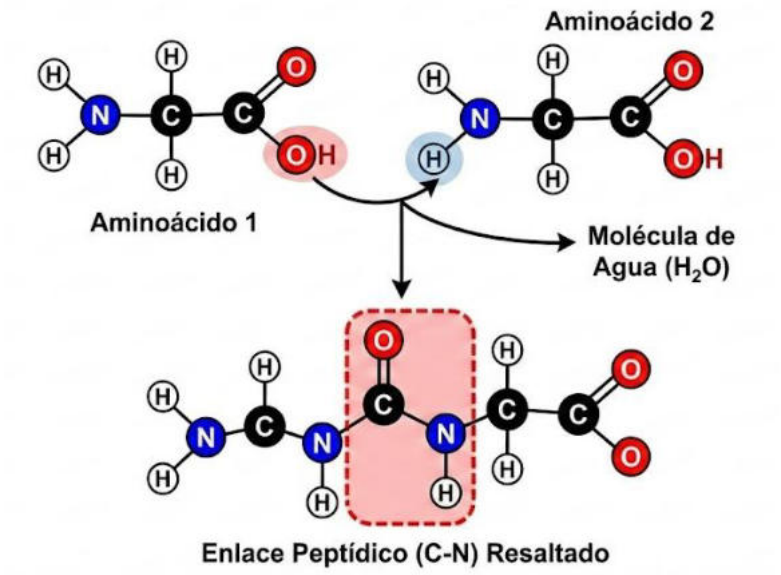



***Figura 16.Enlace peptídico***

***Fuente: los autores***

El mecanismo químico de la formación del enlace peptídico, reacción de condensación imprescindible para la síntesis de proteínas, queda detallado en esta lámina: arriba se muestran dos aminoácidos libres alineados y la reacción transcurre entre el grupo carboxilo (COOH) del primer aminoácido y el amino (NH2) del segundo. Se destaca la liberación de una molécula de agua (H2O) como subproducto (deshidratación), que da paso al enlace covalente de tipo amida (C-N), ilustrado abajo en el recuadro rojo, enlace fuerte y plano que restringe la rotación molecular y, en consecuencia, confiere estabilidad al esqueleto polipeptídico.

## Niveles de organización: el arte del plegamiento

Aquí es donde la biología se vuelve origami. Una proteína no funciona si es solo una larga cuerda floja; necesita doblarse en una forma 3D

precisa para activar sus "superpoderes". Los científicos dividen este proceso en cuatro niveles de complejidad (Alberts et al., 2022; Kennelly et al., 2023):

- **Estructura Primaria** (La Secuencia): Es simplemente el orden lineal de los aminoácidos. Piensa en ello como las letras de una palabra: "AMOR" y "ROMA" tienen las mismas letras, pero significan cosas distintas. Si cambias un solo aminoácido en una cadena de cientos (como cambiar una letra), puedes causar enfermedades graves como la anemia falciforme.
- **Estructura Secundaria** (El Plegado Local): La cadena comienza a enrollarse debido a puentes de hidrógeno entre los componentes del "esqueleto" de la proteína. Las formas más comunes son la hélice alfa (un rizo como un cable de teléfono antiguo) y la lámina beta (pliegues en zigzag como un abanico de papel).
- **Estructura Terciaria** (La Forma 3D Final): Ahora entran en juego los grupos R. Las partes hidrofóbicas se esconden en el centro para huir del agua, y las partes con carga se atraen o repelen. Se forma una estructura tridimensional compacta y única, estabilizada por todo tipo de enlaces químicos. Es la forma funcional de la mayoría de las proteínas.
- **Estructura Cuaternaria** (El Trabajo en Equipo): Algunas proteínas son tan grandes que necesitan formarse por la unión de dos o más cadenas polipéptidas (subunidades). El ejemplo clásico es la hemoglobina, que necesita cuatro subunidades para transportar oxígeno eficazmente.

**Funciones: ¿qué hacen exactamente?**

La forma determina la función. Gracias a su versatilidad estructural, las proteínas pueden hacerlo casi todo (Lieberman & Peet, 2023; Urry et al., 2021)

- Catálisis (Enzimas): Son aceleradores químicos. Sin ellas, la digestión de tu almuerzo tardaría 50 años. (Ej. Amilasa, pepsina).
- Defensa: Protegen contra enfermedades. (Ej. Anticuerpos que neutralizan virus).
- Transporte: Mueven sustancias por el cuerpo o a través de membranas. (Ej. Hemoglobina transportando oxígeno).
- Soporte Estructural: Crean armazones resistentes. (Ej. Colágeno en la piel, queratina en el pelo).
- Movimiento: Permiten la contracción muscular. (Ej. Actina y miosina).
- Regulación Hormonal: Mensajeros químicos. (Ej. Insulina regulando el azúcar en sangre).

**Desnaturalización: cuando se rompe la magia**

Si una proteína se expone a condiciones extremas (demasiado calor, cambios de pH o mucha sal), pierde su estructura 3D: se desenrolla y deja de funcionar. A esto se le llama desnaturalización.

Un ejemplo cotidiano es freír un huevo: el calor desnaturaliza la albúmina de la clara, que pasa de ser transparente y líquida a blanca y sólida. Generalmente, este proceso es irreversible (Nelson & Cox, 2021).

### *2.2.5 Ácidos nucleicos (ADN y ARN): almacenamiento y expresión de la información genética*

Llegamos a la "joya de la corona" de la biología. Si las proteínas son los obreros y los ladrillos, los ácidos nucleicos son los planos maestros y los gerentes de obra. Son las moléculas que guardan el secreto de lo que eres y dirigen todo lo que ocurre en tus células.

Existen dos tipos: el famoso ADN (Ácido Desoxirribonucleico) y su socio, a menudo subestimado, el ARN (Ácido Ribonucleico).

**Los nucleótidos: el alfabeto de la vida**

Tanto el ADN como el ARN son polímeros formados por piezas llamadas nucleótidos. Cada nucleótido tiene tres partes, como si fuera una persona con sombrero y zapatos (Alberts et al., 2022):

- Un Grupo Fosfato: Le da la carga negativa y acidez a la molécula.
- Un Azúcar (Pentosa): Es el cuerpo central. En el ADN es desoxirribosa y en el ARN es ribosa.
- Una Base Nitrogenada: Es la "identidad" del nucleótido. Hay cinco letras en este alfabeto: Adenina (A), Guanina (G), Citosina (C), Timina (T) y Uracilo (U).

**ADN: el disco duro de la herencia**

El ADN es la biblioteca central. Su función es almacenar información a largo plazo de forma segura y estable.

- Estructura: Es una doble hélice comparable a una escalera de caracol, cuyos "peldaños" corresponden a pares de bases unidas por puentes de hidrógeno, y la regla de oro establece que la Adenina (A) se une invariablemente con la Timina (T), y la Guanina (G) lo hace con la Citosina (C).
- Estabilidad: Esta estructura doble protege la información genética en su interior, manteniéndola a salvo de reacciones químicas dañinas. Es tan estable que hemos podido secuenciar ADN de mamuts de hace miles de años.

**ARN: de mensajero a protagonista evolutivo**

Durante décadas, se enseñó que el ARN era un simple "mensajero" o una fotocopia barata del ADN. Hoy sabemos que eso es falso. El ARN es químicamente más versátil y reactivo (tiene un grupo -OH extra en su azúcar), lo que le permite plegarse en formas complejas, casi como una proteína (Alberts et al., 2022)

**Diferencias Clave:**

- Tiene Uracilo (U) en lugar de Timina.
- Suele ser de cadena simple (aunque puede doblarse sobre sí mismo).
- Su azúcar es la ribosa.

El Mundo del ARN: ¿El Origen de Todo? Investigaciones recientes de 2024 publicadas en la prestigiosa revista PNAS han reforzado la hipótesis del "Mundo de ARN". Se ha demostrado que ciertas moléculas de ARN no solo guardan información, sino que pueden actuar como

enzimas (ribozimas) y evolucionar por sí mismas, copiándose con una precisión asombrosa. Esto sugiere que el ARN fue probablemente la primera molécula de la vida, mucho antes que el ADN y las proteínas (Papastavrou et al., 2024)

## El dogma central y la revolución de la epitranscriptómica

Tradicionalmente, el flujo de información se resumía en el "Dogma Central":

ADN → ARN → Proteína

Es decir, el jefe (ADN) da una orden, el mensajero (ARN) la lleva, y el obrero (Proteína) la ejecuta (Ahsan et al., 2023).

Sin embargo, la ciencia actual ha complicado este mapa. Un reporte masivo de las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina (2024) destaca que el ARN sufre cientos de modificaciones químicas después de ser fabricado. Estas modificaciones (llamadas epitranscriptómica) funcionan como un "código sobre el código", regulando cuándo y cómo se fabrican las proteínas, algo vital para entender enfermedades complejas como el cáncer (Toward Sequencing and Mapping of RNA Modifications Committee et al., 2024)

***Table 3. Comparación rápida entre ADN y ARN***

| Característica | ADN (El Archivo) | ARN (La Herramienta) |
|---|---|---|
| **Azúcar** | Desoxirribosa | Ribosa |
| **Bases** | A, G, C, **T** (Timina) | A, G, C, **U** (Uracilo) |
| **Cadenas** | Doble (Bicatenario) | Simple (Monocatenario) |

| | | |
|---|---|---|
| **Función** | Almacén genético estable | Transporte, catálisis y regulación |

***Fuente:*** *(Urry et al., 2021)*

## 2.3. Bioenergética celular

### *2.2.6 Reacciones biológicas fundamentales en las células*

La vida es trabajo, y el trabajo requiere energía. La Bioenergética es la rama de la bioquímica que estudia cómo los sistemas vivos captan, transforman y utilizan la energía (Powers et al., 2024).En esencia, estudia la termodinámica aplicada a los seres vivos.

Todas las reacciones químicas que ocurren dentro de un organismo, desde que se descompone el azúcar que comes hasta que se construye una proteína compleja, se conocen colectivamente como metabolismo.

El metabolismo se organiza en una red intrincada de vías químicas que se dividen en dos bandos opuestos, pero perfectamente coordinados: el catabolismo y el anabolismo

**Catabolismo: el proceso de demolición y obtención de energía**

Imagina que tu célula es un edificio que necesita ser remodelado. El catabolismo es el proceso de demolición.

- Definición: Es el conjunto de vías de degradación o ruptura (catálisis) de moléculas complejas (como carbohidratos, grasas o proteínas) en unidades más simples (como glucosa, ácidos grasos y aminoácidos).

- Naturaleza y Propósito: Son reacciones exergónicas, lo que significa que liberan energía (Zhang, 2023).Esta energía liberada se atrapa y se almacena en la principal moneda energética de la célula: el ATP (Trifosfato de Adenosina). Un ejemplo clásico es la Respiración Celular, donde la glucosa se descompone hasta $CO_2$ y $H_2O$, liberando una gran cantidad de ATP.

**Anabolismo: el proceso de construcción y consumo de energía**

Si el catabolismo es la demolición, el anabolismo es la construcción.

- Definición: Es el conjunto de vías de síntesis de moléculas complejas (como proteínas, ADN, ARN y polisacáridos) a partir de precursores simples.
- Naturaleza y Propósito: Son reacciones endergónicas, lo que significa que requieren un aporte de energía (Zhang, 2023).Para construir una proteína a partir de aminoácidos, la célula debe "pagar" con ATP. El crecimiento, la reparación de tejidos y el almacenamiento de grasa son procesos anabólicos.

**Acoplamiento de reacciones: la batería celular**

La clave de la Bioenergética es que el catabolismo y el anabolismo no son independientes; están acoplados (Aleksandrova & Bonfio, 2022). La energía liberada por las reacciones catabólicas (demolición, liberación de ATP) es inmediatamente utilizada para impulsar las reacciones anabólicas (construcción, consumo de ATP). Este flujo de energía asegura que la química de la vida se mantenga en un estado dinámico,

lejos del equilibrio, lo cual es esencial para mantener la homeostasis (Ostojic, 2024)

### *2.2.7 El rol vital de los compuestos ricos en ATP*

Si el metabolismo fuera el sistema financiero de la célula (como vimos en el punto 2.3.1), el Trifosfato de Adenosina (ATP) no sería otra cosa que la moneda universal, de curso legal e inmediato. Es la molécula que permite a la célula pagar por sus necesidades energéticas más urgentes.

**Estructura química: la fianza de la energía**

El ATP es un nucleótido modificado, y su estructura explica por qué es tan valioso:

1. Adenina: Una base nitrogenada (la misma que encontramos en el ADN y ARN).
2. Ribosa: Un azúcar de cinco carbonos.
3. Tres Grupos Fosfato: Aquí reside la clave. Los grupos fosfato están unidos entre sí por enlaces covalentes, siendo los dos últimos conocidos como enlaces fosfato de alta energía (Urry et al., 2021)

Estos enlaces no son "más fuertes" que otros enlaces químicos, sino que son fácilmente hidrolizables y su ruptura libera una cantidad de energía excepcionalmente útil. La molécula resultante de la ruptura es el Difosfato de Adenosina (ADP), más un grupo fosfato inorgánico ($P_i$).

$ATP + H_2O \rightarrow ADP + P_i + Energía$

**El ciclo ATP-ADP: la batería recargable**

El verdadero poder del ATP reside en que no es una pila desechable, sino una batería recargable

- Carga (Fosforilación): El catabolismo (ruptura de glucosa y grasas) aprovecha la energía liberada para incorporar un grupo fosfato al ADP, que así se convierte nuevamente en ATP, y esta reacción se denomina fosforilación (Nelson & Cox, 2021).
- Descarga (Hidrólisis): La célula "descarga" el ATP rompiendo el enlace fosfato terminal, liberando energía para realizar trabajo celular.
- Este ciclo continuo de síntesis y ruptura, la rotación diaria de ATP y ADP, puede alcanzar una velocidad asombrosa. En un adulto promedio, se sintetiza y se consume una cantidad de ATP que se acerca al peso corporal del individuo ¡cada 24 horas! (Lieberman & Peet, 2023)

**Funciones propulsadas por el ATP**

El ATP no solo suministra energía, sino que participa directamente en las reacciones a través de un proceso llamado fosforilación. Al transferir su grupo fosfato a otra molécula (la cual queda "activada"), el ATP la hace más reactiva y capaz de participar en el trabajo.

El ATP impulsa los tres tipos principales de trabajo celular (Alberts et al., 2022):

- Trabajo Químico (Anabolismo): Suministra la energía para construir macromoléculas, como unir aminoácidos para formar proteínas o construir ADN.

- Trabajo de Transporte: Aporta la energía que se requiere para "bombear" sustancias a través de la membrana plasmática en contra de su gradiente de concentración (Transporte Activo).
- Trabajo Mecánico: Hace posible el movimiento, sea la contracción muscular, el desplazamiento de cilios o flagelos, o bien el de los cromosomas durante la división celular.

## 2.4. La membrana celular y sus mecanismos de transporte

### *2.2.8 Estructura, funciones y permeabilidad selectiva de la membrana plasmática*

La membrana plasmática (o membrana celular) no es solo un envoltorio pasivo, sino la frontera activa y dinámica de la célula. Su función primordial es mantener la homeostasis interna, es decir, el equilibrio químico y físico dentro de la célula, a pesar de las fluctuaciones en el ambiente exterior.

**Estructura: el modelo del mosaico fluido**

La organización molecular de la membrana se describe mediante el Modelo del Mosaico Fluido, propuesto seminalmente por Singer y Nicolson en 1972, y que sigue siendo el marco conceptual fundamental, aunque ha sido refinado con descubrimientos recientes (Alberts et al., 2022). El modelo establece que la membrana es una estructura compuesta por una bicapa lipídica que actúa como solvente, dentro de la cual se encuentran proteínas dispersas como un "mosaico" que flotan en un mar "fluido"

Los componentes principales son:

**Bicapa de Fosfolípidos:** Constituye el armazón fundamental, y cada fosfolípido es una molécula anfipática, lo cual implica que su cabeza hidrofílica (soluble en agua) de fosfato se orienta hacia el exterior y hacia el interior acuoso de la célula, mientras que sus dos colas hidrofóbicas (repelentes al agua) de ácidos grasos se dirigen hacia el centro de la membrana.

Fluidez: La membrana se describe como "fluida" porque los fosfolípidos y las proteínas pueden moverse lateralmente. Esta fluidez se regula por la cantidad de colesterol incrustada, que actúa como un "amortiguador" de temperatura, manteniendo la consistencia adecuada (Zhukov & Popov, 2023)

**Proteínas de Membrana:** Actúan como las "piezas funcionales" del mosaico. Se clasifican en:

-Proteínas Integrales (o Transmembranales): Atraviesan la bicapa completa o quedan profundamente incrustadas, y resultan vitales para el transporte y la señalización.

-Proteínas Periféricas: Unidas laxamente a la superficie interna o externa, a menudo a las proteínas integrales o a los fosfolípidos.

**Carbohidratos (Glicocálix):** Cadenas de azúcares unidas a lípidos (glicolípidos) o a proteínas (glicoproteínas). Forman una capa protectora en la superficie celular conocida como glicocálix, esencial para el reconocimiento célula-célula y la adhesión.

**Funciones vitales de la membrana**

Las proteínas y los lípidos trabajan en conjunto para proporcionar las funciones esenciales de la célula (Miniero, 2025):

- Barrera y Compartimentalización: Separa el ambiente intracelular del extracelular y define los límites de los orgánulos internos.
- Transporte Selectivo: Controla qué sustancias entran y salen, manteniendo gradientes de concentración vitales.
- Comunicación Celular (Señalización): Las señales químicas (hormonas, neurotransmisores) del entorno son detectadas por las proteínas receptoras de la membrana, que trasladan el mensaje al interior celular.
- Actividad Enzimática: Algunas proteínas integrales son enzimas que catalizan pasos de vías metabólicas clave.
- Adhesión y Unión Intercelular: Permite que las células se unan para formar tejidos.

## Permeabilidad selectiva: la regulación del tráfico

Su permeabilidad selectiva es la característica más importante de la membrana. Esto significa que permite el paso libre de algunas sustancias, restringe el de otras y bloquea completamente el paso de unas más, asegurando que el ambiente interno sea constante. El tipo de molécula determina cómo cruza la membrana, tal como resume la Tabla 2:

***Tabla 2.Tipos de moléculas de membrana***

| Tipo de Molécula | Ejemplos | Mecanismo de Cruce |
|---|---|---|
| **Moléculas Hidrofóbicas (No polares)** | $O_2$, $CO_2$, $N_2$, Hidrocarburos (ej. Lípidos) | **Difusión Pasiva.** Cruzan la bicapa lipídica directamente y sin ayuda. |

| | | |
|---|---|---|
| **Moléculas Polares Pequeñas** | $H_2O$, Urea, Etanol | **Difusión Pasiva.** Cruzan lentamente la bicapa (el agua a través de acuaporinas). |
| **Moléculas Polares Grandes** | Glucosa, Aminoácidos | **Transporte Facilitado.** Requieren proteínas de transporte específicas o canales. |
| **Iones y Moléculas Cargadas** | $Na^+$, $K^+$, $Cl^-$, $H^+$ | **Transporte Facilitado.** Requieren canales o bombas proteicas específicas (Zulueta Diaz & Arnspang, 2024). |

***Fuente: (Abali et al., 2022)***

### *2.2.9 Transporte pasivo: difusión simple, difusión facilitada, osmosis y osmorregulación*

El Transporte Pasivo, que la Figura 17 contrapone al activo, es el movimiento de moléculas o iones a través de la membrana celular que ocurre a favor de su gradiente de concentración o su gradiente electroquímico. Como se mueve de un área de mayor concentración a una de menor concentración (o de mayor energía potencial), es un proceso espontáneo que no requiere un aporte de energía (ATP) por parte de la célula (Nelson & Cox, 2021).

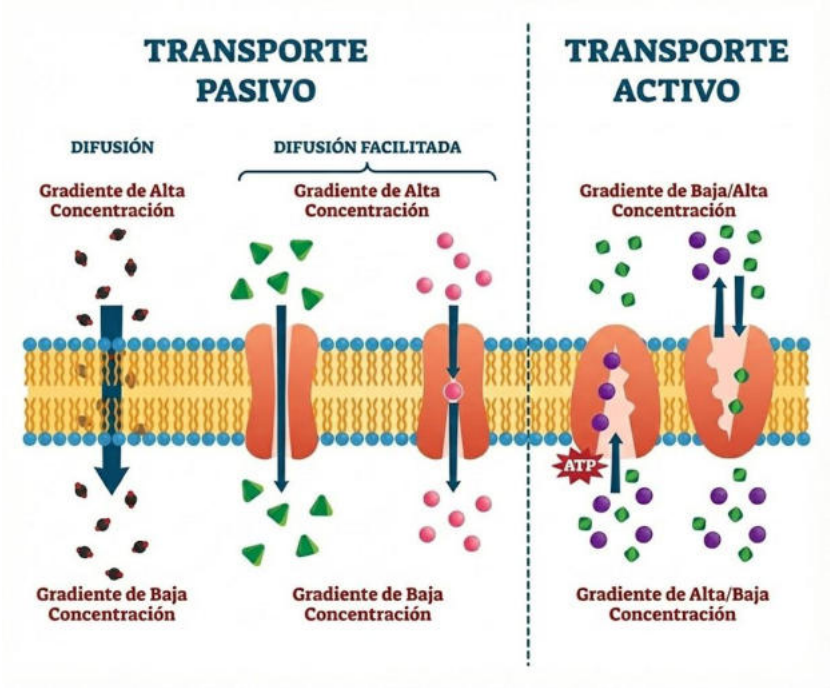



***Figura 17. Transporte activo vs pasivo***

***Fuente: los autores***

En esta ilustración esquemática se contraponen los dos mecanismos principales por los que las sustancias atraviesan la membrana celular: a la izquierda aparece el Transporte Pasivo, proceso exergónico que discurre a favor del gradiente de concentración (de mayor a menor) y que comprende tanto la difusión simple, directa a través de la bicapa lipídica, como la difusión facilitada por proteínas canal o transportadoras. A la derecha, en contraste, se detalla el Transporte Activo, proceso endergónico que impulsa solutos en sentido contrario a su gradiente de concentración ("cuesta arriba"), de ahí que exija de forma ineludible un aporte de energía metabólica, que aquí se simboliza mediante la hidrólisis de ATP, junto a bombas proteicas específicas destinadas a sostener la homeostasis iónica.

**A. Difusión Simple** La forma más básica de transporte pasivo.

- Mecanismo: Las moléculas se mueven directamente a través de la bicapa de fosfolípidos, disolviéndose en el núcleo hidrofóbico de la membrana.
- Sustancias Transportadas: Ocurre principalmente con moléculas pequeñas y no polares (hidrofóbicas) que pueden atravesar fácilmente la barrera lipídica, como los gases respiratorios ($O_2$ y $CO_2$), el nitrógeno, y otras moléculas liposolubles (esteroides, vitaminas liposolubles).
- Velocidad: La tasa de difusión es directamente proporcional al gradiente de concentración y a la solubilidad de la molécula en los lípidos.

**B. Difusión Facilitada:** Este proceso es pasivo (no gasta ATP), pero requiere la ayuda de proteínas de membrana para mover sustancias a través de la bicapa que, de otro modo, cruzarían demasiado lento o no podrían cruzar en absoluto (Urry et al., 2021)

- Mecanismo: Las moléculas hidrofílicas o cargadas se mueven a través de dos tipos principales de proteínas transportadoras:

- Proteínas de Canal: Ofrecen un túnel hidrofílico que ciertas moléculas o iones aprovechan como pasaje, y los canales iónicos (para $Na^+$, $K^+$, $Cl^-$) son ejemplos clave que permiten un movimiento extremadamente rápido.
- Proteínas Transportadoras (Carriers): Se unen a la molécula que ha de ser transportada y modifican su forma para translocarla a través de la membrana, y el transportador de glucosa (GLUT) constituye un ejemplo fundamental.

- Sustancias Transportadas: Iones (como $Na^+$, $K^+$), azúcares (como la glucosa) y aminoácidos.

## Osmosis y osmorregulación

### Osmosis

La ósmosis es un caso especial de difusión pasiva: es la difusión de agua a través de una membrana con permeabilidad selectiva (Powers et al., 2024)

- Mecanismo: El agua se desplaza desde la región donde hay menor concentración de soluto (mayor concentración de agua) hacia aquella de mayor concentración de soluto (menor concentración de agua), de manera que el movimiento se mantiene hasta que las concentraciones de soluto a uno y otro lado de la membrana se igualan o bien hasta que la presión hidrostática generada detiene el flujo.
- Acuaporinas: Si bien el agua es pequeña y polar, atraviesa los lípidos con lentitud, mientras que en muchas células la mayor parte del flujo hídrico corre a cargo de canales proteicos específicos denominados acuaporinas.

### Osmorregulación y Tonicidad

Se entiende por Osmorregulación el control de las concentraciones de soluto y del equilibrio hídrico, proceso vital para la supervivencia celular, y es la tonicidad de la solución circundante la que fija tanto la dirección neta del flujo de agua como el destino de la célula, según sistematiza la Tabla 3:

*Tabla 3.Características en el control de las concentraciones de soluto*

| Solución | Concentración de Soluto | Flujo Neto de Agua | Efecto en la Célula Animal | Efecto en la Célula Vegetal |
|---|---|---|---|---|
| **Isotónica** | Igual que el interior celular. | Ninguno | Normal y estable. | Flácida (sin presión). |
| **Hipertónica** | Mayor que el interior celular. | Sale de la célula. | **Crenación** (encogimiento y arrugamiento). | **Plasmólisis** (la membrana se separa de la pared). |
| **Hipotónica** | Menor que el interior celular. | Entra a la célula. | **Lisis** (estallido celular por exceso de agua). | **Turgencia** (firmeza óptima, pared evita el estallido). |

***Fuente: (Kennelly et al., 2023)***

La pared celular de las plantas, hongos y bacterias permite que estas células mantengan la turgencia en ambientes hipotónicos sin sufrir lisis, a diferencia de las células animales que carecen de esta protección.

### *2.2.10 Transporte activo: exocitosis, endocitosis, fagocitosis y pinocitosis*

El Transporte Activo es el movimiento de moléculas o iones a través de la membrana celular que requiere que la célula gaste energía. Este gasto es necesario porque el movimiento ocurre en contra de su gradiente de concentración (o gradiente electroquímico), moviendo la sustancia de un área de baja concentración a una de alta concentración (un proceso termodinámicamente desfavorable).

## Transporte activo de pequeñas moléculas e iones

El transporte activo de pequeñas moléculas e iones se lleva a cabo mediante proteínas de bombeo o transportadoras especializadas que pueden operar de dos maneras (Nelson & Cox, 2021):

### Transporte activo primario

- **Mecanismo:** La energía procede de la hidrólisis directa del ATP, y una proteína de transporte (bomba) fosforila la molécula, experimenta un cambio de conformación e impulsa la sustancia a través de la membrana.
- **Ejemplo Clave:** La bomba de Sodio-Potasio ($Na^+/K^+$-ATPasa), transportador que expulsa iones $Na^+$ de la célula e introduce iones $K^+$ hacia el interior, ambos contra sus gradientes, con lo que sostiene los gradientes electroquímicos de los que dependen la excitabilidad nerviosa, el potencial de membrana y el transporte secundario.

### Transporte activo secundario (cotransporte)

Mecanismo: El ATP no se utiliza directamente. En cambio, este transporte utiliza la energía potencial almacenada en el gradiente de concentración de un ion (generalmente $Na^+$ o $H^+$), gradiente que fue establecido por el transporte activo primario.

- Una molécula o ion (ej. $Na^+$) se mueve a favor de su gradiente, liberando energía.
- Esa energía liberada es aprovechada por la misma proteína transportadora para movilizar, en contra de su propio gradiente, una segunda molécula (ej. glucosa o aminoácidos).

**Tipos de Cotransporte:**

- **Simporte (o Cotransporte):** Ambas sustancias se mueven en la misma dirección.
- **Antiporte (o Contratransporte):** Las dos sustancias se mueven en direcciones opuestas.

**Transporte activo de macromoléculas: endocitosis y exocitosis**

Para mover moléculas grandes (macromoléculas), partículas o incluso células enteras, la membrana plasmática utiliza mecanismos de transporte masivo que implican la formación o fusión de vesículas; estos procesos requieren un gran gasto de energía (ATP) y se conocen como transporte por vesículas (Urry et al., 2021)

**Exocitosis: movimiento hacia afuera**

Definición: Proceso mediante el cual la célula expulsa material, en concreto, una vesícula de transporte, originada en el aparato de Golgi o bien en el retículo endoplasmático, termina por fusionarse con la membrana plasmática y libera su contenido al espacio extracelular.

Función Vital: Resulta esencial para secretar productos, entre ellos hormonas (ej. insulina), neurotransmisores, proteínas de la matriz extracelular y enzimas digestivas, además de intervenir en el reciclaje de las proteínas de la membrana.

**Endocitosis: movimiento hacia adentro**

Definición: Proceso a través del cual la célula incorpora a su interior moléculas y partículas externas, rodeándolas con la membrana

plasmática hasta formar una vesícula; la Tabla 4 distingue sus modalidades.

***Tabla 4.Tipos de Endocitosis:***

| Tipo de Endocitosis | Etimología | Descripción | Sustancias Internalizadas |
|---|---|---|---|
| **Fagocitosis** | "Comer célula" | La célula engulle una partícula grande (ej. bacteria o resto celular) mediante extensiones membranosas llamadas pseudópodos, formando un fagosoma. | Microorganismos, desechos celulares, partículas grandes. |
| **Pinocitosis** | "Beber célula" | La célula toma pequeñas gotas de líquido extracelular de manera inespecífica. Se forman pequeñas vesículas revestidas que contienen solutos disueltos. | Muestras de solutos y líquidos extracelulares. |
| **Endocitosis Mediada por Receptor** | | Un proceso altamente específico. Las proteínas receptoras en la membrana se unen a ligandos específicos. Los receptores y los ligandos se agrupan en depresiones revestidas (ej. por clatrina) que luego forman una vesícula. | Colesterol (vía LDL), hormonas específicas, proteínas específicas. |

***Fuente: (Urry et al., 2021)***

La endocitosis mediada por receptor es fundamental para internalizar con eficiencia sustancias presentes en bajas concentraciones en el

exterior, caso del colesterol, y resulta crucial en numerosas vías de señalización celular.

## 2.3 Elementos de cierre

Base química: La vida se edifica sobre átomos de carbono y depende del agua en tanto medio de reacción e interacción molecular.

Macromoléculas: Las funciones vitales recaen en: Carbohidratos (energía/estructura), Lípidos (barreras/reservas), Proteínas (maquinaria funcional) y Ácidos Nucleicos (información genética).

Frontera selectiva: Lejos de ser un muro pasivo, la membrana es un mosaico fluido que regula de forma activa qué entra y qué sale para mantener el equilibrio interno.

Coste del transporte: Desplazar sustancias a favor del gradiente no cuesta nada (pasivo), en tanto que hacerlo en contra exige invertir moneda energética (ATP).

Hemos revisado los materiales (macromoléculas) y su entrada a la célula (transporte), pero ¿cómo emplea la célula esos materiales para obtener energía y mantenerse viva? Así pues, el capítulo siguiente se adentrará en el Metabolismo Energético, donde descubriremos de qué modo la célula "quema" estos combustibles químicos mediante rutas metabólicas complejas, a fin de generar el ATP necesario para el transporte activo y la biosíntesis.

## 2.4 Actividades de aprendizaje

- Laboratorio virtual de osmosis: Analizar casos clínicos teóricos sobre qué le sucede a los glóbulos rojos si se les inyecta agua destilada (hipotónica) versus una solución salina concentrada (hipertónica), explicando los conceptos de lisis y crenación.
- Construcción de biomoléculas: Con ayuda de modelos moleculares (o de un dibujo esquemático), representar cómo se forma un enlace peptídico entre dos aminoácidos y otro glucosídico entre azúcares, señalando la liberación de la molécula de agua (síntesis por deshidratación).
- Diagrama de flujo del transporte: Crear un algoritmo o diagrama de decisiones para clasificar el transporte de una sustancia X. (Ej. ¿Es pequeña y apolar? -> Difusión simple. ¿Va contra gradiente? -> Transporte activo).
- Investigación sobre el Colesterol: Realizar un breve informe sobre la "doble cara" del colesterol: su función vital en la fluidez de la membrana y síntesis de hormonas versus sus riesgos en la salud cardiovascular.
- Análisis de estructura proteica: Tomando como ejemplo la hemoglobina o una enzima, describir los cuatro niveles de estructura (primaria a cuaternaria) y explicar qué sucede con su función si se altera el pH o la temperatura (desnaturalización)

# CAPÍTULO III

# 3 METABOLISMO ENERGÉTICO Y RUTAS BIOQUÍMICAS

## 3.1 Introducción al capítulo

Con este capítulo entramos en la "economía" de la célula, dado que ya conocemos los materiales de construcción y resta comprender cómo se financian las operaciones vitales. El metabolismo se explorará no como una serie de reacciones aisladas, sino como una red que integra rutas catabólicas (que liberan energía) con otras anabólicas (que consumen energía), articuladas todas por la moneda universal: el ATP. Paso a paso desglosaremos la respiración celular aeróbica, desde que la glucosa se rompe en la glucólisis hasta la compleja fosforilación oxidativa que ocurre en la mitocondria; sumado a ello, revisaremos las estrategias que permiten sobrevivir en ausencia de oxígeno (fermentación y respiración anaeróbica) y el modo en que los ciclos biogeoquímicos, el del nitrógeno entre ellos, dependen de tipos metabólicos especializados que sostienen la biosfera.

## 3.2 Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- Interpretar cómo se acoplan energéticamente catabolismo y anabolismo, y explicar el ciclo ATP-ADP como mecanismo central de transferencia de energía.
- Describir cada etapa de la respiración celular aeróbica (glucólisis, ciclo de Krebs y cadena de transporte de electrones),

precisando en qué punto se genera la mayor cantidad de ATP y qué papel desempeña el oxígeno.

- Comparar la eficiencia energética de la respiración aeróbica, la anaeróbica y la fermentación, y razonar por qué ciertos organismos recurren a rutas de bajo rendimiento.
- Categorizar a los organismos por su fuente de energía, de electrones y de carbono (autótrofos, heterótrofos, quimiolitótrofos), y vincular cada tipo metabólico con la función ecológica que cumple.

## 3.1. Generalidades del metabolismo celular

### *3.2.1 Definición, energía y finalidades del metabolismo*

**¿Qué es realmente el metabolismo?**

Es muy común escuchar frases como "tengo el metabolismo lento" o "necesito activar mi metabolismo", generalmente asociadas a dietas y ejercicio. Pero en biología celular, este concepto es mucho más vasto y profundo. Si la célula fuera una ciudad inmensa y ajetreada, el metabolismo sería la economía total de esa ciudad: cada transacción, cada construcción de un edificio, cada camión de basura y cada planta de energía funcionando al mismo tiempo.

Científicamente, definimos el metabolismo como la suma total de todas las reacciones químicas catalizadas por enzimas que ocurren dentro de un organismo vivo (Nelson & Cox, 2021). No es un evento aislado, sino una red altamente coordinada y cooperativa de intercambios químicos. Estas reacciones no ocurren por azar; están organizadas en lo que llamamos rutas metabólicas, donde una molécula específica se

transforma en un producto a través de una serie de pasos definidos, cada uno acelerado por una enzima específica (Urry et al., 2021).

## El juego de la energía: bioenergética

Mantener en marcha esta "ciudad celular" exige algo fundamental, energía, y de ello se ocupa la Bioenergética, el estudio de cómo los organismos administran sus recursos energéticos. La vida, en esencia, no es sino una lucha constante contra las leyes de la física, y en concreto contra la termodinámica.

- Primera Ley (Conservación): La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma. Las células son transformadoras maestras; convierten la energía química de los alimentos (o la lumínica del sol) en trabajo biológico (Alberts et al., 2022)
- Segunda Ley (Entropía): El universo tiende naturalmente al desorden (entropía). Para mantener el orden complejo de la vida (como tu ADN o tus membranas) y no desmoronarse en el caos, la célula debe gastar energía constantemente, liberando calor en el proceso Audesirk et al., 2020)

Como explican Kennelly et al. (2023), los seres vivos somos sistemas abiertos que intercambian materia y energía con el entorno para mantenernos en un estado estacionario dinámico, lejos del equilibrio termodinámico. Si una célula llegara al equilibrio completo con su entorno, significaría que ha muerto.

## Las cuatro grandes finalidades del metabolismo

¿Por qué la célula se toma tanta molestia? El metabolismo no es un capricho, es una necesidad de supervivencia que cumple cuatro funciones vitales específicas, según la literatura bioquímica más reciente (Abali et al., 2022; Nelson & Cox, 2021):

- **Obtención de Energía Química (El Combustible):** La prioridad número uno es capturar energía del entorno, ya sea de la luz solar (fotosíntesis) o degradando nutrientes ricos en energía como la glucosa, y almacenarla en una molécula que funcione como "moneda de cambio universal": el ATP (Adenosín Trifosfato). Sin ATP, ninguna maquinaria celular funciona.
- **Conversión de Nutrientes en "Ladrillos" (Precursores**): Los alimentos que consumimos (o producimos) rara vez llegan con la forma exacta que hace falta, de manera que el metabolismo transforma los nutrientes de origen exógeno en las unidades básicas de construcción (precursores) que la célula reclama, tales como aminoácidos, nucleótidos, azúcares simples y ácidos grasos.
- **Ensamblaje de Macromoléculas (La Construcción):** Cuando ya se dispone de la energía (ATP) y de los ladrillos (precursores), el metabolismo emplea unos y otros para levantar las estructuras complejas que nos definen, esto es, proteínas, ácidos nucleicos (ADN/ARN), lípidos de membrana y polisacáridos, síntesis de la que dependen tanto el crecimiento como la reparación de tejidos.
- **Formación y Eliminación de Desechos (La Limpieza):** Toda actividad productiva genera residuos. El metabolismo

también se encarga de transformar y eliminar los subproductos tóxicos (como el amoníaco o el dióxido de carbono) antes de que envenenen la célula (Lieberman & Peet, 2023).

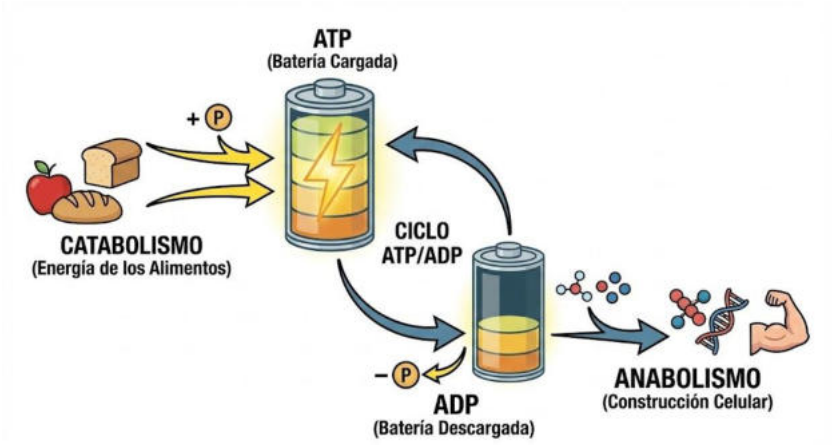



***Figura 18.Catabolismo y anabolismo***

***Fuente: los autores***

En esta infografía el ciclo ATP/ADP aparece como eje fundamental del acoplamiento energético celular, y la analogía de una batería sirve para representar el flujo termodinámico entre los procesos que liberan energía y los que la consumen. El esquema muestra cómo el catabolismo oxidativo de los nutrientes es lo que impulsa la fosforilación del ADP (la "carga" energética), de manera que se genera ATP de alto potencial de transferencia de grupos fosfato; por el contrario, al hidrolizarse estos enlaces fosfoanhídrido se libera la energía libre de Gibbs que sustenta el anabolismo, el transporte activo y el trabajo mecánico, con lo que la molécula retorna a su estado de baja energía (ADP) y el ciclo vuelve a comenzar.

### *3.2.2 Clasificación, fases y tipos: anabolismo y catabolismo*

**El yin y el yang de la célula**

Si observamos el metabolismo de cerca, veremos que no es un caos uniforme, sino una danza perfectamente equilibrada entre dos fuerzas opuestas. Para sobrevivir, la célula necesita tanto destruir como construir. Los científicos clasifican estas reacciones en dos grandes "equipos" que trabajan simultáneamente: el Catabolismo (degradación) y el Anabolismo (biosíntesis) (Nelson et al., 2021).

Imagina que estás jugando con bloques de construcción. A veces tienes que destruir una torre vieja para recuperar las piezas (Catabolismo) y usar esas mismas piezas, más algo de esfuerzo, para armar un castillo nuevo y espectacular (Anabolismo), acoplamiento que la Figura 18 representa mediante el ciclo ATP/ADP.

**Catabolismo: la fase de demolición y energía**

El catabolismo (del griego *kata*, "hacia abajo") engloba todas las rutas metabólicas degradativas. Su función es romper moléculas complejas y ricas en energía (como glúcidos, lípidos y proteínas) en moléculas más simples y pobres en energía (como $CO_2$, $H_2O$ y amoníaco) (Abali et al., 2022).

- **Es Exergónico:** Su rasgo definitorio consiste en liberar energía ($\Delta G < 0$), puesto que al romperse los enlaces químicos de los alimentos se desprende energía libre que la célula captura de inmediato para fabricar ATP y transportadores de electrones reducidos (NADH, NADPH).

- **Es Oxidativo:** Generalmente implica quitar electrones a los nutrientes (oxidarlos) para obtener su energía química.
- **Ejemplo clásico:** La respiración celular, donde la glucosa es "desmantelada" paso a paso para extraer toda su energía útil.
- Investigaciones recientes en bioenergética clínica destacan que el catabolismo no es solo "destrucción"; es un sistema de respuesta adaptativa. Por ejemplo, durante el ayuno o el ejercicio intenso, el cuerpo activa rutas catabólicas específicas (como la oxidación de grasas) para mantener el suministro de ATP vital, un fenómeno conocido como "flexibilidad metabólica" (Galgani et al., 2022).

**Anabolismo: la fase de construcción y gasto**

Bajo el nombre de *ana*bolismo (del griego ana, "hacia arriba") se agrupa el conjunto de rutas biosintéticas, en las cuales la célula recoge moléculas precursoras simples (aminoácidos, azúcares, ácidos grasos) y las ensambla hasta obtener macromoléculas complejas y ordenadas (proteínas, polisacáridos, lípidos de membrana y ácidos nucleicos).

- **Es Endergónico:** Construir orden cuesta caro. Estas reacciones requieren un aporte constante de energía ($\Delta G > 0$), la cual proviene casi siempre de la hidrólisis del ATP generado previamente por el catabolismo (Nelson et al., 2021).

- **Es Reductivo:** Para unir las piezas, a menudo se necesitan electrones de alta energía, suministrados por el poder reductor del NADPH.

- **Ejemplo clásico:** La síntesis de proteínas, donde la célula gasta gran cantidad de ATP para unir aminoácidos en el orden exacto dictado por el ADN.

Estudios actuales sobre termodinámica microbiana han demostrado que la eficiencia del anabolismo es crucial para el crecimiento; las células optimizan matemáticamente sus rutas para minimizar el desperdicio de calor mientras maximizan la producción de biomasa (Calabrese et al., 2021; Niebel et al., 2019).

**El acoplamiento: ¿cómo se conectan?**

El anabolismo y el catabolismo no ocurren en habitaciones separadas; están acoplados funcional y energéticamente. El ATP actúa como el "puente" entre ambos mundos.

Este acoplamiento es tan vital que cualquier fallo en la comunicación entre la demanda anabólica (crecimiento) y el suministro catabólico (energía) puede derivar en patologías graves (Li et al., 2025).destacan *Frontiers in Microbiology* que la regulación molecular precisa de estos procesos es lo que permite a las células adaptarse a cambios ambientales extremos sin colapsar.

Además, la salud metabólica depende de la capacidad de cambiar fluidamente entre estos estados (Ostojic, 2024).señala que la pérdida de

esta capacidad de acoplamiento dinámico es una causa subyacente de enfermedades crónicas y envejecimiento celular.

### *3.2.3 Rutas metabólicas y tipos metabólicos primarios (autótrofos y heterótrofos)*

**El mapa de carreteras: las rutas metabólicas**

Si pudieras encoger hasta el tamaño de una molécula y entrar en una célula, no verías reacciones químicas ocurriendo al azar como palomitas de maíz estallando. Verías un tráfico organizado. Una ruta metabólica es una secuencia ordenada de reacciones químicas donde el producto de una reacción se convierte inmediatamente en el sustrato (ingrediente) de la siguiente (Urry et al., 2021).

Imagina el sistema de metro de una gran ciudad. Cada estación es una molécula intermedia y cada túnel es una reacción facilitada por una enzima específica. Según la estructura de este "viaje", los bioquímicos clasifican las rutas en tres formas geométricas principales:

- Rutas Lineales: Como una carretera recta. Entras en el punto A y sales en el punto Z. Un ejemplo clásico es la glucólisis (que veremos más adelante).
- Rutas Ramificadas: Como una autopista con desvíos. Una molécula inicial puede tomar diferentes caminos para producir distintos productos finales dependiendo de lo que la célula necesite en ese momento.
- Rutas Cíclicas: Como una rotonda. La molécula inicial se une a otra, da una vuelta completa transformándose, y al final se regenera el componente original para empezar de

nuevo. El Ciclo de Krebs es el "rey" de las rotondas metabólicas (Kennelly et al., 2023).

La biología de sistemas moderna ha revelado que estas rutas no están aisladas; forman una "red metabólica global" interconectada. Un estudio reciente explica que esta interconexión permite a las células redirigir el flujo de nutrientes instantáneamente si una ruta se bloquea, asegurando la supervivencia ante el estrés (Vandekeere et al., 2024).

**Dime qué comes y te diré qué eres: clasificación metabólica**

Todos los seres vivos tenemos las mismas necesidades básicas: necesitamos carbono para construir nuestro cuerpo y energía para funcionar. Sin embargo, la fuente de donde sacamos estos recursos nos divide en dos bandos evolutivos fundamentales. Esta clasificación se basa en la fuente de carbono.

**Autótrofos: los autosuficientes o productores**

La palabra viene del griego *autos* (propio) y *trophos* (alimento). Estos organismos son los verdaderos alquimistas de la vida.

- **¿Qué hacen?** Son capaces de captar carbono inorgánico simple (sobre todo dióxido de carbono, $CO_2$) del aire o del agua y de convertirlo en moléculas orgánicas complejas como la glucosa, es decir, "fabrican comida del aire", proceso que la Figura 19 desglosa en sus dos fases dentro del cloroplasto.

- **¿Quiénes son?** Las plantas, las algas y ciertas bacterias (como las cianobacterias).

- **Importancia:** Son los productores primarios de la biosfera. Sin ellos, la cadena alimenticia colapsaría porque son la base que sostiene a todos los demás. Investigaciones recientes sobre fijación de carbono destacan cómo la ingeniería genética intenta potenciar esta capacidad en cultivos para combatir el cambio climático y mejorar la producción de alimentos (Garritano et al., 2022).

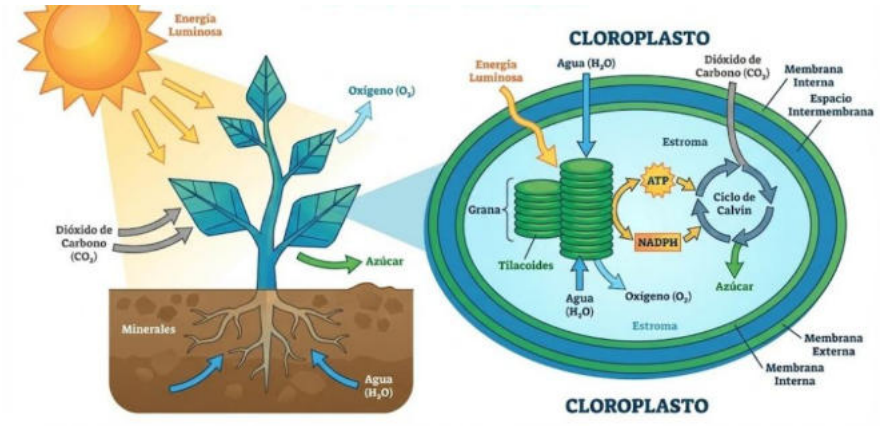



***Figura 19.Fotosíntesis***

***Fuente: los autores***

El panel izquierdo contextualiza el intercambio de materia y energía a nivel organísmico (captación de luz, CO2 y H2O), mientras que el esquema derecho detalla la maquinaria metabólica dentro del cloroplasto. Se distinguen estructuralmente los dos escenarios de reacción: la membrana de los tilacoides (apilados en granas), donde ocurre la fase fotoquímica con la fotólisis del agua y la generación de ATP y NADPH; y el estroma, fluido donde estos cofactores impulsan el Ciclo de Calvin para la fijación del carbono y la biosíntesis de azúcares.

**Heterótrofos: los que se alimentan de otros o consumidores**

Del griego *heteros* (otro). Aquí es donde entramos nosotros, los humanos, junto con todos los animales, los hongos y muchas bacterias.

**¿Qué hacen?** Son incapaces de fabricar su propia comida a partir de $CO_2$. Deben obtener su carbono consumiendo moléculas orgánicas ya preformadas por otros organismos (comiendo plantas o comiendo animales que comieron plantas).

**¿Quiénes son?** Van desde el león hasta el moho del pan o la bacteria *E. coli* que habita en tu intestino.

**Dependencia:** Biológicamente, los heterótrofos somos totalmente dependientes de los autótrofos (Garritano et al., 2022).resaltan esta interacción obligatoria: los heterótrofos consumen oxígeno y materia orgánica devolviendo $CO_2$ a la atmósfera, el cual es vital para que los autótrofos continúen su trabajo, cerrando así el ciclo global del carbono.

Entender esta división es clave: los autótrofos construyen el escenario de la vida y los heterótrofos somos los actores que vivimos en él, reciclando sus materiales.

### 3.2. Respiración celular aeróbica

**¡A quemar combustible! La Gran Central Energética**

Una vez que la célula ha capturado nutrientes, necesita oxidarlos de manera controlada para extraer la energía y almacenarla en forma de ATP. La respiración celular aeróbica es el proceso metabólico por excelencia para hacer esto, y es la razón por la que necesitamos respirar

oxígeno (Urry et al., 2021). Este proceso ocurre principalmente en las mitocondrias, el motor de la célula, y consiste en degradar la glucosa completamente hasta convertirla en $CO_2$ y $H_2O$, liberando una enorme cantidad de energía que se traduce en hasta 32 moléculas de ATP.

Este complejo proceso de cosecha de energía se divide didácticamente en cuatro fases interconectadas:

1 Glucólisis

2 Formación de Acetil CoA (Oxidación del Piruvato)

3 Ciclo del Ácido Cítrico (Ciclo de Krebs)

4 Fosforilación Oxidativa.

Cada fase es como un equipo de re-ingeniería que trabaja en cadena para desmontar la molécula de glucosa y liberar su potencial energético (Nelson & Cox, 2021). Sin embargo, solo la primera fase, la Glucólisis, puede ocurrir en ausencia de oxígeno, lo que la convierte en una ruta universal y ancestral en casi todos los organismos.

### *3.2.4 Introducción y fases iniciales: glucólisis y formación de acetil CoA*

**Fase I: glucólisis, la ruptura del azúcar**

La glucólisis (del griego *glykys*, dulce, y *lysis*, ruptura) es la ruta metabólica más antigua y universal de la vida, ya que se lleva a cabo en el citosol de la célula, fuera de la mitocondria. Su misión es sencilla: tomar una molécula de glucosa de seis carbonos y dividirla en dos

moléculas de piruvato de tres carbonos. Este proceso de diez pasos no requiere oxígeno, por lo que es la base tanto para la respiración aeróbica como para la anaeróbica (Zeng et al., 2021).

Esta ruta se divide en dos etapas principales: la Fase de Inversión de Energía y la Fase de Generación de Energía. En la primera etapa, la célula gasta 2 moléculas de ATP para "activar" la glucosa, haciéndola inestable y lista para romperse, lo que asegura que la reacción continúe en una sola dirección (Nelson & Cox, 2021). En la segunda fase, se produce la fosforilación a nivel de sustrato, que es un método rápido para generar un total de 4 moléculas de ATP, dando una ganancia neta de 2 ATP por molécula de glucosa, además de 2 moléculas de NADH, que serán fundamentales más adelante.

La glucólisis no solo sirve para obtener energía rápida, sino que también funciona como un centro de señalización crucial. Estudios recientes, como una revisión de 2024 en *Journal of Biological Chemistry*, destacan que los metabolitos intermedios de esta ruta se han reconocido como moléculas de señalización que regulan la expresión génica, la proliferación y la adaptación celular en estados de estrés, como la hipoxia o la inflamación. Esta capacidad dual subraya su importancia más allá de la simple producción de ATP, demostrando su rol en el mantenimiento de la homeostasis y en el desarrollo de patologías como el cáncer (Charpidou et al., 2024). Por ejemplo, se ha demostrado que las células tumorales aumentan drásticamente su tasa glucolítica para sustentar su rápida proliferación y progresión, un fenómeno que hoy es clave para el desarrollo de nuevos tratamientos oncológicos (Hubenov et al., 2024)

**Fase II: formación de acetil CoA, el portero de la mitocondria**

El producto final de la glucólisis, el piruvato, todavía contiene mucha energía útil, pero para oxidarla por completo se necesita oxígeno y las mitocondrias (Nelson & Cox, 2021). Por lo tanto, el piruvato debe ser transportado activamente desde el citosol hacia la matriz mitocondrial. Una vez allí, se enfrenta a un gigantesco y complejo multienzimático: el Complejo de la Piruvato Deshidrogenasa (PDH).

El Complejo PDH funciona como "portero" o "puente" obligatorio entre la glucólisis y el Ciclo de Krebs, y su reacción resulta irreversible en la mayoría de los tejidos, es decir, una vez transformado el piruvato ya no hay vuelta atrás hacia la glucosa (Lieberman & Peet, 2023). En el transcurso de este proceso, denominado descarboxilación oxidativa, se elimina un grupo carboxilo del piruvato, con la consiguiente liberación de una molécula de $CO_2$, en tanto que el grupo acetilo restante se oxida y se une a una coenzima A hasta formar la molécula clave: el Acetil CoA.

La regulación del Complejo PDH es uno de los puntos más estrictamente controlados del metabolismo y es esencial para la homeostasis energética. La actividad del PDH es controlada por enzimas cinasas (PDK) y fosfatasas (PDP) que la inactivan o reactivan, respectivamente. Esta regulación asegura que el flujo de carbono hacia el Ciclo de Krebs solo ocurra cuando hay abundante oxígeno y poca necesidad de precursores para la construcción, evitando el uso excesivo del "combustible" de glucosa y permitiendo a la célula cambiar eficientemente entre el uso de carbohidratos y grasas según la necesidad metabólica (Zeng et al., 2021).

### *3.2.5 . El ciclo del ácido cítrico (ciclo de Krebs)*

**El horno de fusión: el corazón del metabolismo aeróbico**

Una vez que el piruvato se ha transformado en Acetil CoA por el Complejo PDH, ha llegado el momento de entrar en la fase central y más productiva de la respiración celular aeróbica: el Ciclo del Ácido Cítrico, conocido popularmente como el Ciclo de Krebs (Nelson & Cox, 2021). Este proceso recibe su nombre por Hans Adolf Krebs, el bioquímico que lo describió, y ocurre en la matriz mitocondrial, el espacio interior de la mitocondria.

El Ciclo de Krebs es una ruta metabólica cíclica, lo que significa que la molécula inicial que recibe el Acetil CoA se regenera al final para poder comenzar otra vuelta (Kennelly et al., 2023). Su objetivo no es producir grandes cantidades de ATP directamente (solo genera una molécula de ATP, o su equivalente GTP, por vuelta), sino que su función primordial es extraer la máxima energía de los dos carbonos del grupo acetilo, empaquetándola en las cruciales moléculas transportadoras de alta energía: NADH y $FADH_2$ (Urry et al., 2021).

**Las ocho estaciones de la rueda energética**

El ciclo consta de ocho reacciones catalizadas por enzimas específicas. En cada vuelta, el "equipo" del Ciclo de Krebs desarma por completo el Acetil CoA, liberando sus átomos de carbono como dióxido de carbono ($CO_2$) y capturando los electrones liberados:

1 Inicio: El Acetil CoA (2C) se une al oxalacetato (4C) y da lugar al citrato (6C), de donde procede el nombre alternativo de Ciclo

del Ácido Cítrico (Lieberman & Peet, 2023), una reacción altamente exergónica y prácticamente irreversible que asegura la entrada del flujo de carbono en el ciclo.

2 Oxidación y Descarboxilación: Mediante una serie de pasos, la molécula de 6 carbonos atraviesa dos descarboxilaciones sucesivas, de manera que dos de sus átomos de carbono salen como CO2 (el que exhalamos al respirar), y al romperse esos enlaces se desprenden electrones que quedan capturados de inmediato para formar dos moléculas de NADH (Kennelly et al., 2023).

3 Fosforilación a Nivel de Sustrato: En un punto del ciclo, se produce la única generación directa de energía: una molécula de guanosín trifosfato (GTP), que es fácilmente convertible a ATP, demostrando la capacidad del ciclo para generar una pequeña cantidad de energía de forma instantánea (TeSlaa et al., 2023)

4 Reciclaje Final: Los pasos finales reorganizan la molécula de cuatro carbonos restante para producir una molécula de $FADH_2$ y otra de NADH, regenerando finalmente la molécula inicial, el oxalacetato (Urry et al., 2021).

**Un centro de conversión, no solo de energía**

Aunque su función principal es generar transportadores de electrones, el Ciclo de Krebs es el principal centro de convergencia y divergencia del metabolismo celular, lo que se conoce como una ruta anfibólica (Abali et al., 2022). Esto significa que no solo está involucrado en el catabolismo (oxidando Acetil CoA), sino que sus intermediarios son vitales para el anabolismo (construcción). Por ejemplo, los intermediarios del ciclo pueden ser extraídos (un proceso llamado

*reacciones de 'relleno'* o anapleróticas) para construir aminoácidos, lípidos y las bases de los nucleótidos, proveyendo los ladrillos para que la célula pueda crecer y repararse (Lieberman & Peet, 2023).

En resumen, por cada molécula de Acetil CoA que entra, el ciclo produce:

- 2 moléculas de CO2
- moléculas de NADH
- 1 molécula de $FADH_2$
- 1 molécula de ATP (o GTP)

Este arsenal de NADH y $FADH_2$ ahora está listo para la fase final, la Cadena de Transporte de Electrones, donde se obtendrá la mayor parte de la energía (Nelson & Cox, 2021).

### *3.2.6 Cadena de transporte de electrones y quimiósmosis*

**La gran cosecha: de electrones a ATP**

Las dos primeras fases de la respiración celular (Glucólisis y Ciclo de Krebs) han cumplido su misión catabólica: desmantelar la glucosa y capturar la mayor parte de su energía en forma de electrones de alta energía, almacenados en el NADH y el $FADH_2$ (Nelson & Cox, 2021). El objetivo de la fase final es convertir esa energía electrónica en la moneda de cambio celular: el ATP. Esta fase, conocida como Fosforilación Oxidativa, genera aproximadamente el 90% de todo el ATP producido por la célula, un rendimiento energético muy superior a la pequeña ganancia neta de la glucólisis.

## La cadena de transporte de electrones (CTE)

La Cadena de Transporte de Electrones (CTE), esquematizada en la Figura 20, es la primera parte de la fosforilación oxidativa, y ocurre en la membrana mitocondrial interna (Kennelly et al., 2023). Esta membrana está altamente plegada, formando las crestas, lo que maximiza el área superficial para albergar miles de copias de los cuatro grandes complejos proteicos (I, II, III y IV) que forman la cadena. El NADH y el $FADH_2$ entregan sus electrones a estos complejos; el NADH los deposita en el Complejo I, y el $FADH_2$ en el Complejo II.

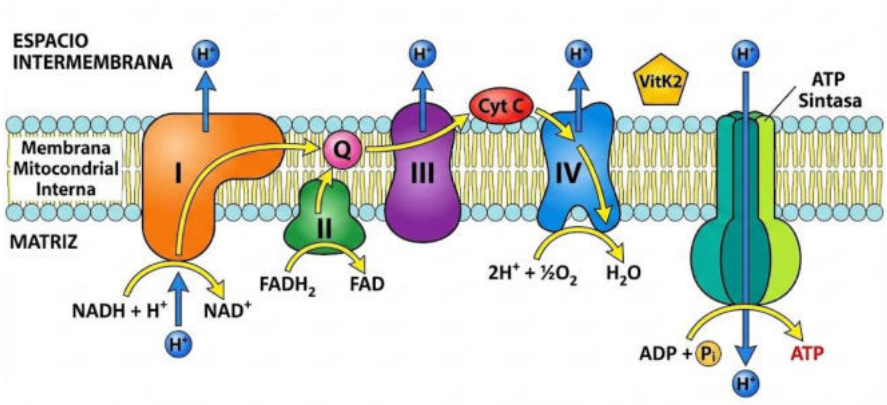



***Figura 20.Cadena de transporte de electrones***

***Fuente: los autores***

La ilustración esquematiza la fosforilación oxidativa, etapa culminante de la respiración celular que ocurre en la membrana mitocondrial interna, y detalla cómo los electrones se transfieren de forma secuencial a través de los complejos enzimáticos (del I al IV) con ayuda de transportadores móviles como la Ubiquinona (Q) y el Citocromo C, un proceso que la reoxidación de NADH y FADH2 mantiene en marcha. Dicho flujo redox se acopla termodinámicamente al bombeo de protones

(H+) hacia el espacio intermembrana, de manera que se establece un gradiente electroquímico (fuerza protonmotriz), y esa energía potencial acciona por último el rotor de la ATP Sintasa (quimiosmosis) para sintetizar ATP, mientras que el oxígeno molecular actúa como aceptor final de electrones y se reduce a agua (H2O).

A medida que los electrones son transferidos de un complejo a otro (siguiendo un camino de creciente afinidad por los electrones), liberan pequeños chorros de energía, como si bajaran por una escalera (Urry et al., 2021). Esta energía liberada no se usa para crear ATP directamente, sino para bombear iones de hidrógeno ($H^+$ o protones) desde la matriz mitocondrial hacia el espacio intermembrana, creando una alta concentración de protones en ese espacio. Al final de la cadena, el aceptor final de electrones es el Oxígeno ($O_2$), el cual se combina con los protones para formar Agua ($H_2O$) (Abali et al., 2022). Si el oxígeno no está presente, los electrones se acumulan, la cadena se detiene, y la producción masiva de ATP se paraliza.

**Quimiósmosis: el poder del gradiente**

El bombeo activo de protones ($H^+$) genera una diferencia de concentración (gradiente químico) y de carga eléctrica (gradiente eléctrico) a través de la membrana interna (Lieberman & Peet, 2023). Esta combinación se denomina fuerza protón-motriz, y almacena una inmensa cantidad de energía potencial, similar a la energía almacenada en el agua de una presa que se contiene en altura. La Quimiósmosis es el proceso por el cual esta energía potencial se libera para sintetizar ATP.

Los protones, impulsados por la fuerza protón-motriz, solo tienen una vía para regresar a la matriz: a través de una enzima gigantesca y espectacular llamada ATP Sintasa (Nelson & Cox, 2021). Esta enzima funciona como una "turbina molecular"; el flujo de protones que pasa por ella hace que el rotor de la enzima gire físicamente. Esta rotación utiliza la energía del gradiente para catalizar la unión de ADP (Adenosín Difosfato) con un grupo fosfato inorgánico, produciendo grandes cantidades de ATP. Por cada molécula de glucosa que ingresa, la CTE y la Quimiósmosis trabajan conjuntamente para generar la mayor parte de la energía celular disponible, sellando el éxito de la respiración aeróbica.

## 3.3. Metabolismo de bajo rendimiento energético

La vida, en su búsqueda implacable de energía, ha desarrollado estrategias de supervivencia cuando el oxígeno molecular, el aceptor final ideal de electrones en la respiración aeróbica, es escaso o inexistente (Urry et al., 2021). Estas estrategias se agrupan bajo el término "metabolismo de bajo rendimiento energético", y son esenciales para organismos que viven en hábitats anóxicos, como los sedimentos profundos, pantanos o el intestino humano, así como para nuestras propias células musculares durante el ejercicio intenso.

### *3.2.7 Respiración anaeróbica*

**La ingeniería del plan B: la cadena de transporte sin oxígeno**

La Respiración Anaeróbica es un proceso metabólico que, al igual que la respiración aeróbica, utiliza una Cadena de Transporte de Electrones (CTE) para generar ATP a través de la quimiósmosis (Nelson & Cox,

2021). La diferencia fundamental radica en que, en lugar de usar oxígeno ($O_2$) como aceptor final de electrones para oxidar el NADH y el $FADH_2$, los organismos anaeróbicos utilizan otras moléculas inorgánicas distintas al oxígeno, lo que subraya la versatilidad de las rutas bioquímicas evolutivas (Kennelly et al., 2023).

Este tipo de respiración, por lo tanto, no debe confundirse con la fermentación, ya que es un proceso mucho más sofisticado y eficiente que también se lleva a cabo en la membrana plasmática de las bacterias o arqueas, generando una fuerza protón-motriz (Lieberman & Peet, 2023). La capacidad de algunos microorganismos para llevar a cabo la respiración anaeróbica es vital en los ciclos biogeoquímicos del planeta, como los ciclos del nitrógeno y del azufre, ya que permite la conversión de compuestos en diversos estados de oxidación (Abali et al., 2022)

**Aceptores finales alternativos: la diversidad bioquímica**

La eficiencia energética de la respiración anaeróbica depende directamente de la molécula que actúe como aceptor final de electrones, ya que el potencial de reducción de este aceptor determina la cantidad de energía que se libera al transferir los electrones (Nelson & Cox, 2021). Cuanto mayor sea la diferencia de potencial entre el donante de electrones (como el NADH) y el aceptor final, más ATP se podrá generar. En general, el oxígeno es el aceptor con el potencial de reducción más alto, por lo que las respiraciones anaeróbicas suelen ser menos productivas que la aeróbica (Urry et al., 2021).

Algunos de los aceptores de electrones inorgánicos más comunes en los organismos anaeróbicos, principalmente bacterias y arqueas, incluyen:

- **Nitrato ($NO_3^-$):** Utilizado en la Desnitrificación. El nitrato se reduce a nitrito ($NO_2^-$), óxido nítrico (NO), óxido nitroso ($N_2O$) o gas nitrógeno ($N_2$). Este proceso es fundamental para liberar nitrógeno de vuelta a la atmósfera, cumpliendo un rol clave en el ciclo global de este elemento (Kennelly et al., 2023).
- **Sulfato ($SO_4^{2-}$):** Lo emplean las bacterias reductoras de sulfato, que lo reducen hasta sulfuro de hidrógeno ($H_2S$), gas responsable del característico olor a "huevo podrido" propio de los ambientes anóxicos.
- **Fumarato:** Si bien se trata de una molécula orgánica, puede funcionar como aceptor final en ciertos microorganismos anaeróbicos, eso sí, con una producción de ATP muy baja.
- **Carbonato o Dióxido de Carbono ($CO_2$):** Es el aceptor final en la metanogénesis, un proceso realizado por arqueas que produce metano ($CH_4$), un potente gas de efecto invernadero (Nelson & Cox, 2021)

**Rendimiento y flexibilidad metabólica**

A diferencia de la respiración aeróbica, que produce un rendimiento teórico máximo de hasta 32 ATP por glucosa, la respiración anaeróbica rinde significativamente menos, generalmente entre 2 y 30 ATP, dependiendo del aceptor utilizado. A pesar de este bajo rendimiento, para los microorganismos que viven en nichos donde el oxígeno está permanentemente ausente, esta ruta es su única fuente viable para generar la fuerza protón-motriz y sostener sus funciones vitales, demostrando una notable flexibilidad metabólica (Lieberman & Peet, 2023).

La capacidad de alternar entre aceptores de electrones es una ventaja competitiva clave. Por ejemplo, ciertas bacterias intestinales pueden cambiar de nitrato a fumarato o sulfato dependiendo de la disponibilidad de estos compuestos en el lumen intestinal, asegurando la continuidad de la producción de ATP y contribuyendo a la compleja ecología microbiana de nuestro cuerpo (Urry et al., 2021). Este sistema demuestra que la vida no siempre busca la máxima eficiencia, sino la suficiencia y la adaptabilidad para prosperar en una amplia gama de condiciones ambientales.

### *3.2.8 Fermentación: alcohólica y del lactato*

**La solución de emergencia: regenerando el NAD+**

La fermentación es una ruta metabólica de bajo rendimiento energético que, al igual que la respiración anaeróbica, ocurre en ausencia de oxígeno, pero con una diferencia bioquímica crucial: no utiliza una Cadena de Transporte de Electrones (CTE) (Nelson & Cox, 2021). Esto significa que no hay un aceptor final de electrones externo como el oxígeno, el nitrato o el sulfato. El único propósito de la fermentación es regenerar el $NAD^+$ que se consume durante la glucólisis (Urry et al., 2021).

Recordemos que la glucólisis solo produce una ganancia neta de **2** ATP por molécula de glucosa, pero para seguir funcionando, debe consumir $NAD^+$ y reducirlo a NADH. Si no hay oxígeno ni un aceptor externo disponible, el NADH se acumula. Cuando el $NAD^+$ se agota, la glucólisis se detiene, y la célula muere por falta de energía (Lieberman & Peet, 2023). Por lo tanto, la fermentación se define como un

mecanismo que permite la oxidación de $NADH$ (convirtiéndolo de nuevo en $NAD^+$) mediante la transferencia de sus electrones a una molécula orgánica (el piruvato o un derivado), asegurando la continuidad de la glucólisis y la supervivencia celular (Kennelly et al., 2023).

**La fermentación del lactato o láctica: el sobreviviente muscular**

La fermentación láctica es la ruta de emergencia que utilizan nuestras células musculares cuando el suministro de oxígeno es temporalmente insuficiente, como durante un *sprint* intenso (Abali et al., 2022). También es la ruta principal en ciertos microorganismos, como las bacterias del género *Lactobacillus*, vitales en la producción de yogur y quesos, de ahí su nombre.

- **El Proceso:** Después de la glucólisis, el piruvato de tres carbonos actúa como el aceptor final de electrones. Una enzima clave, la lactato deshidrogenasa, cataliza la transferencia de electrones del NADH al piruvato (Urry et al., 2021).
- **El Producto Final:** El piruvato se reduce, dando como resultado el lactato (ácido láctico) (Nelson & Cox, 2021). Lo esencial es que al oxidar el NADH y regenerar el $NAD0^+$, se permite que la glucólisis continúe produciendo esos 2 ATP cruciales.
- **Efectos Biológicos:** En los músculos humanos, la acumulación de lactato puede ser una de las causas de la fatiga muscular temporal. Sin embargo, este lactato no es un simple desecho; puede ser transportado al hígado y

reconvertido en glucosa (el Ciclo de Cori) o ser usado como combustible por el corazón y otros músculos en reposo, demostrando que el metabolismo siempre busca un uso para sus subproductos (Kennelly et al., 2023).

**La fermentación alcohólica: la ruta de la cerveza y el pan**

La fermentación alcohólica es la estrategia de supervivencia metabólica utilizada por muchos organismos unicelulares, siendo el ejemplo más conocido la levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) (Lieberman & Peet, 2023). Este proceso es fundamental para las industrias de panadería, cervecería y vitivinicultura, pues son los productos finales de la ruta los que tienen valor comercial.

- **Doble Descarboxilación:** A diferencia de la fermentación láctica, este proceso requiere dos enzimas para transformar el piruvato. Primero, el piruvato se descarboxila (liberando una molécula de $CO_2$) para formar un compuesto intermedio de dos carbonos llamado acetaldehído (Kennelly et al., 2023)
- **La Reducción Final:** El acetaldehído acepta los electrones del NADH (regenerando el $NAD^+$) para formar el producto final deseado: el etanol (alcohol etílico) (Nelson & Cox, 2021). Es el $CO_2$ liberado en el primer paso el que hace que el pan suba y la cerveza burbujee, mientras que el etanol es el componente embriagador de las bebidas alcohólicas.

**Rendimiento energético: un costo necesario**

La fermentación, ya sea láctica o alcohólica, tiene un costo, su bajísimo rendimiento energético, dado que el ATP total generado iguala al de la glucólisis, apenas 2 moléculas netas de ATP por glucosa (Nelson & Cox, 2021), lo que representa menos del 7% del rendimiento de la respiración aeróbica. Ahora bien, en un medio carente de oxígeno 2 ATP son infinitamente más que cero, de manera que el organismo sobrevive hasta que las condiciones ambientales mejoren. Estas rutas constituyen un ejemplo brillante de adaptación evolutiva, por cuanto anteponen la velocidad y la independencia del oxígeno a la máxima eficiencia energética.

## 3.4. Clasificaciones metabólicas específicas y ciclos biogeoquímicos

La vasta diversidad de la vida en la Tierra se refleja en una asombrosa variedad de estrategias para obtener los recursos fundamentales: energía y carbono. La clasificación básica entre autótrofos y heterótrofos, vista en la sección 3.1.3, aunque fundamental, resulta insuficiente para describir la complejidad metabólica de los microorganismos que pueblan nuestro planeta (Urry et al., 2021). Los bioquímicos utilizan un sistema de clasificación de tres ejes que define a un organismo según la fuente de energía, la fuente de electrones (o poder reductor) y la fuente de carbono que utiliza para construir su biomasa, lo que revela las adaptaciones evolutivas necesarias para la supervivencia en nichos ambientales extremos (Nelson & Cox, 2021).

### *3.2.9 Tipos metabólicos: fotosintéticos, quimiosintéticos, litótrofos, organótrofos y fotolitótrofos*

**El eje de energía: fotótrofos frente a quimiótrofos**

El primer y principal eje de clasificación se basa en cómo el organismo obtiene la energía necesaria para impulsar todas sus reacciones celulares. La vida tiene esencialmente dos opciones de "combustible" para generar el ATP inicial: la luz o las reacciones redox de compuestos químicos (Kennelly et al., 2023).

- **Fotótrofos:** Estos organismos son los "cosechadores de luz" (*photo* = luz). Son capaces de capturar la energía luminosa, típicamente utilizando pigmentos como la clorofila, para convertirla en energía química utilizable (ATP y poder reductor) a través de un proceso llamado fotosíntesis (Abali et al., 2022). Las plantas y las cianobacterias son los ejemplos más conocidos, siendo cruciales para la atmósfera y la cadena trófica global.
- **Quimiótrofos:** Son los "comedores de químicos" (*chemo* = químico), organismos que no recurren a la luz, sino que extraen su energía de reacciones de oxidación-reducción (redox) sobre compuestos químicos inorgánicos u orgánicos (Urry et al., 2021). En este grupo nos encontramos los humanos, puesto que oxidamos la glucosa (un químico orgánico) para obtener energía, y en él figuran también bacterias que oxidan amoníaco o sulfuro de hidrógeno, piezas fundamentales de los ciclos biogeoquímicos.

**El eje de electrones: litótrofos frente a organótrofos**

El segundo eje de clasificación, con frecuencia omitido en los esquemas simplificados, atiende a la fuente de electrones (o poder reductor) de la que se sirve la biosíntesis, en particular cuando se reduce el $CO_2$ en los autótrofos (Nelson & Cox, 2021). Los electrones resultan esenciales por

cuanto se requieren tanto para ensamblar moléculas orgánicas complejas como para generar el NADH y el $FADH_2$ que alimentan las cadenas de transporte.

- **Litótrofos:** Los "comedores de rocas" (*lithos* = roca). Son organismos capaces de obtener sus electrones a partir de donantes inorgánicos, como el agua ($H_2O$), sulfuro de hidrógeno ($H_2S$), iones ferrosos ($Fe^{2+}$) o amoníaco ($NH_3$) (Lieberman & Peet, 2023). La capacidad de oxidar estas moléculas inorgánicas les permite existir en entornos donde la materia orgánica escasea, como las chimeneas hidrotermales submarinas o los suelos profundos.

- **Organótrofos:** Los "comedores orgánicos" (*organo* = orgánico). Estos organismos obtienen sus electrones directamente de la oxidación de compuestos orgánicos complejos (como la glucosa, las grasas o las proteínas) (Kennelly et al., 2023). Prácticamente todos los animales, hongos y las bacterias patógenas entran en esta categoría, ya que dependen de la materia orgánica preexistente para obtener tanto su carbono como su energía y electrones.

**Combinando los ejes: la nomenclatura detallada**

La combinación de estos dos ejes con la fuente de carbono (Autótrofos: $CO_2$ vs. Heterótrofos: carbono orgánico) da lugar a las cuatro (o más) categorías metabólicas detalladas que describen la nutrición celular de manera completa (Abali et al., 2022):

**Fotoautótrofos o fotosintéticos**

- **Energía:** Luz.
- **Carbono:** $CO_2$ (inorgánico).
- **Electrones (comúnmente):** $H_2O$ (inorgánico) o **Fotolitótrofos**.
- **Descripción:** Son la base de la cadena alimentaria. Utilizan la energía de la luz para convertir el $CO_2$ en azúcares, liberando $O_2$ si utilizan agua como donante de electrones (plantas, algas, cianobacterias) (Urry et al., 2021)

**Quimioorganoheterótrofos u organótrofos heterótrofos**

- **Energía:** Reacciones químicas (orgánicas).
- **Carbono:** Compuestos orgánicos.
- **Electrones:** Compuestos orgánicos.
- **Descripción:** Incluye a la totalidad de los animales, hongos y la mayoría de las bacterias (Lieberman & Peet, 2023). Deben consumir materia orgánica ya sintetizada, utilizándola para obtener energía (mediante glucólisis y respiración) y como bloques de construcción para su biomasa, siendo totalmente dependientes de los productores primarios.

**Quimiolitótrofos o quimiosintéticos**

- **Energía:** Reacciones químicas (inorgánicas).
- **Carbono:** $CO_2$ (inorgánico) o **Quimioautótrofos**.
- **Electrones:** Compuestos inorgánicos (ej. $Fe^{2+}$, $H_2S$, $NH_3$).
- **Descripción:** Son los héroes invisibles de los ecosistemas (J, 2024). Utilizan la oxidación de compuestos inorgánicos para obtener energía, que luego utilizan para fijar $CO_2$

(como las plantas). Son los productores primarios de ambientes extremos, como en el fondo marino, donde la luz solar no penetra, demostrando que la vida puede prosperar sin luz (Nelson & Cox, 2021)

**Fotolitótrofos**

- **Energía:** Luz.
- **Carbono:** Generalmente $CO_2$ (aunque puede variar).
- **Electrones:** Compuestos inorgánicos distintos al agua (ej. $H_2S$ en lugar de $H_2O$).
- **Descripción:** Son un subconjunto de fotótrofos (Kennelly et al., 2023). Algunas bacterias fotosintéticas púrpuras o verdes, por ejemplo, realizan fotosíntesis, pero no liberan $O_2$ porque utilizan $H_2S$ como donante de electrones, lo que produce azufre como subproducto en lugar de oxígeno (Urry et al., 2021). Este sistema ilustra la increíble diversidad de mecanismos para capturar la energía del sol, variando simplemente el donante de electrones, y son esenciales para entender la evolución temprana de la fotosíntesis antes de la invención de la fotólisis del agua.

**Implicaciones de los tipos metabólicos**

La comprensión de estos tipos metabólicos no es solo una cuestión de clasificación taxonómica, sino que es fundamental para la Biología de Sistemas. La existencia de quimiolitótrofos y fotolitótrofos permite que la vida se distribuya en casi cualquier nicho ecológico, desde los más hostiles hasta los más abundantes, asegurando el reciclaje continuo de

elementos (Nelson & Cox, 2021). Esta interconexión de tipos metabólicos alimenta los Ciclos Biogeoquímicos, siendo el próximo punto el análisis del ciclo del nitrógeno, donde estas bacterias litótrofas y organótrofas juegan un papel insustituible.

### *3.2.10 El ciclo del nitrógeno: fijación, nitrificación y desnitrificación*

#### La molécula indispensable: por qué el nitrógeno es el motor de la vida

El nitrógeno es, después del carbono, el elemento más crucial para la vida, siendo un componente esencial de los aminoácidos, las proteínas, los ácidos nucleicos (ADN y ARN) y el ATP (Urry et al., 2021). A pesar de que la atmósfera terrestre está compuesta por casi un 78% de gas nitrógeno ($N_2$), esta molécula es biológicamente inerte debido al triple enlace covalente extremadamente estable que une a sus dos átomos. Este triple enlace requiere una energía inmensa para romperse, lo que hace que el nitrógeno atmosférico sea directamente inutilizable para la mayoría de los seres vivos, como plantas y animales (Lieberman & Peet, 2023). El Ciclo del Nitrógeno es, por lo tanto, el conjunto de procesos biológicos y químicos que transforman esta forma inerte de $N_2$ en compuestos reactivos y asimilables, como el amoníaco ($NH_3$) y el nitrato ($NO_3^-$), cerrando así la brecha entre la atmósfera y la biosfera (Galgani et al., 2022).

Este ciclo, que tiene lugar principalmente en el suelo y el agua, es un testimonio de la increíble sofisticación del metabolismo microbiano, donde cada etapa crítica está mediada por bacterias y arqueas con metabolismos especializados, incluyendo quimiótrofos y litótrofos, lo

que subraya la interdependencia entre los distintos tipos metabólicos discutidos en el apartado 3.4.1 (Kennelly et al., 2023). Si este ciclo se detuviera, el suministro de proteínas y material genético a nivel global colapsaría, impactando directamente la producción de ATP y la regulación celular.

**Fases críticas del ciclo del nitrógeno**

El ciclo del nitrógeno se divide en cinco etapas metabólicamente distintas:

**Fijación de nitrógeno**

La Fijación de Nitrógeno es la puerta de entrada del nitrógeno atmosférico a la biosfera y es, quizás, el proceso más energéticamente exigente de todo el ciclo, debido a la necesidad de romper el triple enlace del $N_2$ (Abali et al., 2022). Solo ciertas bacterias y arqueas, llamadas diazótrofos, poseen el complejo enzimático necesario para realizar esta hazaña.

- **El Proceso:** Los diazótrofos utilizan la enzima nitrogenasa, que transforma el gas nitrógeno ($N_2$) en amoníaco ($NH_3$) o su forma ionizada, amonio ($NH_4^+$) (Nelson & Cox, 2021). Esta reacción es una reducción masiva, que requiere una entrada colosal de energía y poder reductor, típicamente 16 moléculas de ATP y 8 electrones por cada molécula de $N_2$ fijada. Las células deben realizar este proceso en condiciones anaeróbicas para proteger la nitrogenasa, ya que la enzima es irreversiblemente inactivada por el oxígeno (Lieberman & Peet, 2023).

- **Tipos de Fijadores:** Existe la fijación simbiótica, realizada por bacterias como *Rhizobium* en las raíces de leguminosas, donde la planta suministra ATP y un ambiente anaeróbico a cambio del amonio. También existe la fijación libre, realizada por cianobacterias, que son fotoautótrofas y fijan nitrógeno en el agua, contribuyendo significativamente a la fertilidad de los océanos (Urry et al., 2021). Este proceso es un ejemplo de cómo la vida ha cooptado rutas metabólicas de alta energía para superar una barrera química fundamental.

**Amonificación o mineralización**

La Amonificación o Mineralización es el proceso mediante el cual el nitrógeno orgánico que forma parte de la biomasa (proteínas, ADN) regresa al suelo o al agua en forma inorgánica.

- **El Proceso:** Cuando los organismos mueren o excretan desechos, las bacterias y hongos quimioheterótrofos (organótrofos), que obtienen su energía y carbono de la materia orgánica, descomponen estas macromoléculas (Kennelly et al., 2023).
- **El Producto Final:** La descomposición libera el nitrógeno en forma de amonio ($NH_4^+$) al ambiente. Este amonio es crucial porque actúa como el sustrato para la siguiente fase del ciclo. Este proceso de reciclaje asegura que el nitrógeno no quede "secuestrado" en la materia muerta, sino que se mantenga en circulación constante y disponible para los productores primarios (Nelson et al., 2021)

## Nitrificación

La Nitrificación es, metabólicamente, una de las fases más interesantes porque es llevada a cabo por organismos quimiolitótrofos especializados que obtienen su energía exclusivamente de la oxidación de compuestos inorgánicos (Abali et al., 2022). La oxidación se realiza en dos pasos distintos, catalizados por dos grupos microbianos diferentes.

- **Paso 1:** Nitritación**:** Las bacterias del género *Nitrosomonas* (entre otras) actúan como litótrofos oxidando el amonio ($NH_4^+$) a nitrito ($NO_2^-$) (Nelson & Cox, 2021). Esta oxidación libera una pequeña cantidad de energía que estas bacterias utilizan, en lugar de la luz o la materia orgánica, para fijar $CO_2$ y construir sus propias moléculas orgánicas (autotrofía) (Urry et al., 2021).
- **Paso 2: Nitratación:** El nitrito ($NO_2^-$), un compuesto que puede ser tóxico en altas concentraciones, es rápidamente oxidado a nitrato ($NO_3^-$) por bacterias del género *Nitrobacter* (Lieberman & Peet, 2023). El nitrato es la forma de nitrógeno más soluble y más fácilmente asimilable por la mayoría de las plantas, convirtiendo la nitrificación en un proceso esencial para la fertilidad del suelo, ya que transforma el amonio (que se une al suelo) en nitrato (que es móvil) (Kennelly et al., 2023)

## Asimilación y desnitrificación

Los últimos dos pasos cierran el ciclo:

- **Asimilación:** Las plantas y otros productores primarios absorben el amonio o el nitrato del suelo, y utilizan la energía del ATP y el poder reductor para incorporar el nitrógeno en aminoácidos y nucleótidos (Kennelly et al., 2023). Los animales obtienen su nitrógeno consumiendo estas plantas u otros animales, siendo quimioheterótrofos dependientes.
- **Desnitrificación:** Esta fase es el contrapunto de la fijación, ya que devuelve el nitrógeno a la atmósfera como $N_2$ (Nelson & Cox, 2021). La desnitrificación es llevada a cabo por bacterias quimioheterótrofas facultativas (como *Pseudomonas*) que viven en suelos anóxicos, pobres en oxígeno.
- **Metabolismo Clave:** En ausencia de $O_2$, estas bacterias realizan Respiración Anaeróbica (como se describió en 3.3.1), utilizando el nitrato ($NO_3^-$) como aceptor final de electrones para su Cadena de Transporte (Nelson et al., 2021)
- **El Producto Final:** Al aceptar los electrones, el nitrato se reduce progresivamente a nitrito, óxido nitroso ($N_2O$) y, finalmente, gas nitrógeno ($N_2$). Este proceso cierra el ciclo y es vital para prevenir la acumulación excesiva de nitrato en los ecosistemas (Urry et al., 2021)

**Balance y regulación global**

El ciclo del nitrógeno es un ejemplo perfecto de cómo las rutas metabólicas microscópicas de los organismos determinan los procesos

macroscópicos que sostienen la vida en el planeta. Es un ciclo finamente sintonizado, donde la entrada de nitrógeno por la fijación (un proceso de alta energía) se equilibra con la salida por la desnitrificación (un proceso de baja energía dependiente de la respiración anaeróbica). La salud de este equilibrio es crucial, ya que la intervención humana, a través de la producción industrial de fertilizantes (proceso Haber-Bosch), ha alterado masivamente el flujo de nitrógeno, lo que tiene consecuencias significativas para la calidad del agua y la biodiversidad global (Abali et al., 2022)

### 3.3 Elementos de cierre

Bioenergética: La vida es un sistema termodinámico abierto que requiere un flujo constante de energía para mantener el orden y evitar el equilibrio (muerte).

Centrales de Energía: Tanto la mitocondria como la cadena de transporte de electrones resultan imprescindibles a la hora de maximizar la extracción energética de los nutrientes mediante la quimiósmosis.

Flexibilidad Metabólica: Cuando escasea el oxígeno, la célula dispone de la fermentación para regenerar el NAD+ y sostener la glucólisis, si bien el costo energético que paga por ello es alto.

Interconexión Global: Rutas metabólicas microscópicas, entre ellas la fijación de nitrógeno a cargo de las bacterias, sostienen el funcionamiento de los ciclos globales de nutrientes.

Ya se ha visto cómo la célula obtiene y administra su energía, pero, ¿quién dirige este tráfico molecular? ¿Quién garantiza que las

reacciones sucedan a la velocidad que la vida exige y no en tiempos geológicos? El capítulo final se ocupa de los agentes de Control Molecular: las enzimas, de manera que veremos cómo estos catalizadores vuelven posible el metabolismo y cómo el ser humano aprendió a domesticarlos para dar origen a la Biotecnología, hasta cerrar la brecha que separa la biología básica de la ingeniería aplicada.

## 3.4 Actividades de aprendizaje

- Mapa de Rutas Metabólicas: Diseñar un mapa conceptual gigante que conecte la Glucólisis, el Ciclo de Krebs y la Cadena de Transporte de Electrones. Deben resaltar los puntos donde se genera ATP, NADH y $FADH_2$, y dónde se libera $CO_2$.
- Caso de Estudio "La carrera de 100 metros": Analizar fisiológicamente lo que sucede en la musculatura de un velocista, así como explicar por qué aparece lactato (fermentación láctica) en vez de completarse la respiración aeróbica, para luego vincularlo con la "deuda de oxígeno".
- Simulación de Balance Energético: Calcular cuánto ATP rinde en teoría una sola molécula de glucosa frente a la que aporta un ácido graso, con la justificación de por qué las grasas constituyen una reserva energética más densa.
- Debate sobre Tipos Metabólicos: Asignar un "personaje" microbiano a los grupos de estudiantes (ej. una bacteria desnitrificante, una arquea metanógena), con la consigna de exponer cómo consiguen su energía y su carbono, y por qué resultan vitales para el ecosistema.

- Experimento Casero de Fermentación: Observar la actividad de la levadura (Saccharomyces cerevisiae) con azúcar en agua tibia dentro de una botella con un globo. Explicar que el inflado del globo se debe a la descarboxilación del piruvato (producción de $CO_2$) durante la fermentación alcohólica.

# CAPÍTULO IV

# 4 CONTROL MOLECULAR Y APLICACIONES BIOQUÍMICAS

## 4.1 Introducción al capítulo

Llegamos al capítulo final, donde la biología molecular se encuentra con la tecnología. Primero, desvelaremos el secreto de la velocidad de la vida: las enzimas. Estudiaremos cómo estos catalizadores proteicos reducen la energía de activación, permitiendo que las reacciones ocurran en milisegundos. Analizaremos su cinética y cómo factores como el pH y la temperatura pueden "apagarlas". Finalmente, daremos el salto a la Biotecnología Aplicada. Veremos cómo hemos pasado de observar la naturaleza a rediseñarla, utilizando enzimas inmovilizadas y microorganismos genéticamente modificados para revolucionar la industria alimentaria, la medicina y la biorremediación, consolidando una "química verde" para el futuro.

## 4.2 Objetivos de aprendizaje

- Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:
- Explicar cómo actúan las enzimas (modelo llave-cerradura y ajuste inducido), así como el modo en que reducen la energía de activación de las reacciones.
- Interpretar gráficas de cinética enzimática (Michaelis-Menten), definiendo conceptos clave como Vmax y Km y su relevancia farmacológica.
- Evaluar qué ventajas aporta la inmovilización enzimática en los procesos industriales respecto del empleo de enzimas

solubles, con mención de beneficios como la reutilización y la estabilidad.

- Analizar en qué aplicaciones industriales reales intervienen las enzimas (ej. producción de lácteos sin lactosa, detergentes, biocombustibles), reconociendo así cuánto incide la biotecnología en la vida cotidiana.

## 4.1. Enzimas como catalizadores biológicos

### *4.2.1 Naturaleza de las enzimas y su rol como catalizadores*

**La fábrica de la vida y sus superaceleradores**

Imagina tu cuerpo como una fábrica química inmensa y compleja, cuyo funcionamiento (es decir, respirar, pensar, crecer o digerir la comida) obliga a que ocurran miles de reacciones químicas cada segundo. Muchas de ellas, sin embargo, resultan intrínsecamente "perezosas", a tal punto que, en las condiciones suaves de nuestro organismo (temperatura moderada y pH casi neutro), serían tan lentas que la vida sencillamente no lograría sostenerse; por fortuna, la célula desarrolló unas herramientas espectaculares que aceleran ese proceso de manera segura y controlada: las enzimas (Lieberman & Peet, 2023).

En esencia, las enzimas constituyen los catalizadores biológicos de la vida, entendiendo por catalizador toda sustancia que acelera una reacción química sin consumirse en el trayecto; de ahí que una sola molécula de enzima logre cumplir su tarea miles, e incluso millones de veces, antes de que la célula requiera reemplazarla, eficiencia que sostiene la base de la bioquímica celular (Alberts et al., 2022).

## La naturaleza de las enzimas: proteínas con forma de llave

En su inmensa mayoría, las enzimas son proteínas. Como aprendiste en capítulos anteriores, las proteínas son macromoléculas complejas formadas por cadenas de aminoácidos que se pliegan en una estructura tridimensional única. Esta forma, o conformación, es lo que define su función específica. Piensa en ellas como sofisticadas máquinas moleculares con una arquitectura precisa que les permite interactuar con solo un ingrediente, o un grupo muy limitado de ingredientes, llamado sustrato (Cossetto et al., 2025)

Si bien la mayoría de las enzimas son proteínas, existe una excepción fascinante: algunas moléculas de ARN (ácido ribonucleico) también pueden funcionar como catalizadores. Estas enzimas basadas en ARN son conocidas como ribozimas, y su existencia es una prueba de la versatilidad de los ácidos nucleicos y su papel central en la evolución temprana de la vida (Li et al., 2020)

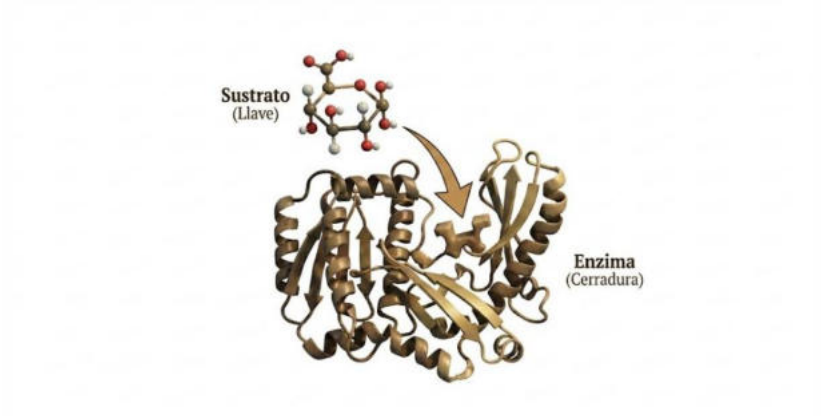



***Figura 21.Modelo de llave y cerradura, hexoquinasa y glucosa***

***Fuente: los autores***

El esquema recoge el modelo clásico de "Llave y Cerradura" (propuesto por Emil Fischer), con el que se explica la base estructural de la especificidad enzimática: la enzima aparece figurada como una macromolécula proteica de conformación tridimensional rígida (el "candado"), dotada de un sitio activo cuya geometría está predefinida, mientras que el sustrato (la "llave") exhibe una estructura molecular complementaria y encaja en dicho sitio de forma precisa y exclusiva. Tal selectividad favorece la formación del complejo enzima-sustrato, paso crítico por cuanto disminuye la energía de activación y cataliza la transformación química sin que la enzima llegue a consumirse.

**El rol catalítico: bajando la montaña de energía**

Para que una reacción química se inicie, las moléculas de los reactivos han de chocar con la orientación correcta y contar con un mínimo de energía, la que se conoce como energía de activación ($E_a$); cuando esa barrera resulta muy alta, la reacción transcurre con lentitud, dado que muy pocas moléculas alcanzan la energía requerida.

Reducir de manera drástica esa barrera de energía de activación constituye la función crucial de toda enzima, como se aprecia en la Figura 22, si bien conviene advertir que el punto de partida y el punto final de la reacción permanecen intactos: no altera la energía libre total ($\Delta G$) ni desplaza el equilibrio químico, sino que ofrece un camino de reacción alternativo y mucho más sencillo para llegar a la meta. Es como si, en vez de empujar un coche por encima de la cima de una gran montaña, la enzima abriera un túnel a través de ella, de manera que el proceso ocurra casi instantáneamente (Lieberman & Peet, 2023).

## La clave del éxito: el sitio activo y el ajuste inducido

La especificidad de la enzima y su increíble velocidad se deben a una pequeña región en su superficie llamada el Sitio Activo, como se observa en la Figura 21. Este sitio es una hendidura o bolsillo dentro de la estructura de la proteína que posee la forma y los grupos químicos (cadenas laterales de aminoácidos) perfectos para unirse al sustrato específico.

Cuando el sustrato se une al Sitio Activo, se forma el complejo enzima-sustrato (ES). Esta unión a menudo induce un cambio de forma muy sutil en la enzima que optimiza el encaje, fenómeno conocido como el modelo de ajuste inducido (Mohidem et al., 2023). Este ajuste es crítico: no solo asegura que solo la molécula correcta se una, sino que también ejerce tensión sobre los enlaces químicos del sustrato, facilitando su ruptura, formación o transferencia, y acelerando así la transformación en el producto deseado (Alberts et al., 2022).

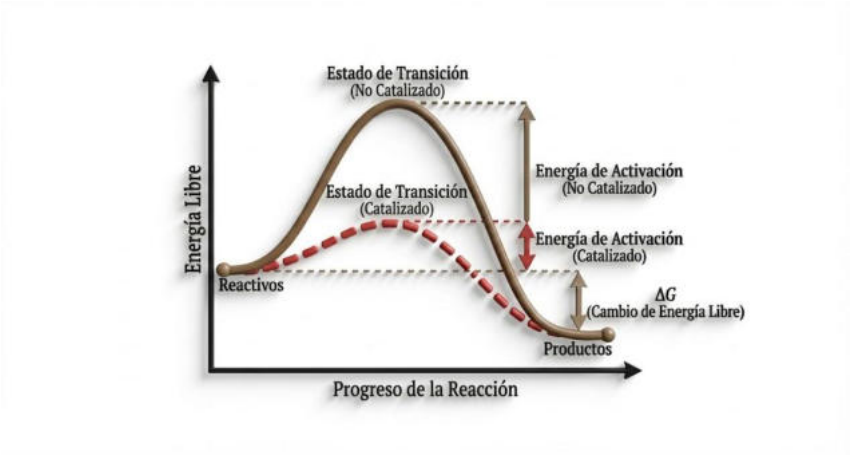



***Figura 22.Diagrama de energía, reacción catalizada vs no catalizada***

***Fuente: los autores***

En esta gráfica de coordenadas de reacción se ilustra el principio termodinámico fundamental de la catálisis enzimática mediante la comparación de dos perfiles energéticos para una reacción exergónica: la curva sólida marrón corresponde a la vía no catalizada, que exige superar una alta barrera de energía de activación hasta alcanzar el estado de transición, mientras que la curva punteada roja recoge la ruta catalizada, en la cual la presencia de la enzima estabiliza ese estado de transición y rebaja drásticamente la energía de activación necesaria. Conviene reparar en que el cambio neto de energía libre (Delta G) que media entre reactivos y productos permanece inalterado, de ahí que quede demostrado de forma visual que las enzimas aceleran la cinética de la reacción sin que su equilibrio termodinámico se modifique.

### *4.2.2 Actividad enzimática y cinética molecular*

**La carrera de la química: ¿qué tan rápido podemos ir?**

Ya sabemos que las enzimas son las máquinas de la célula, pero... ¿a qué velocidad trabajan? Aquí es donde entra la cinética enzimática, la rama de la bioquímica que se dedica a medir la velocidad de las reacciones y a entender los pasos detallados por los cuales el sustrato se transforma en producto.

La actividad enzimática no es otra cosa que una medida de la cantidad de sustrato que una enzima puede convertir en producto por unidad de tiempo. Imagina que estás cronometrando a un chef picando cebollas; la "actividad" sería cuántas cebollas pica por minuto. En el laboratorio, esto nos permite saber si una enzima está funcionando correctamente, si está dañada o si algo la está regulando (Nelson et al., 2021)

## El efecto de la concentración: la analogía del cajero de supermercado

Para entender cómo funciona la velocidad, debemos mirar la concentración de sustrato (S). Imagina un supermercado con un solo cajero (la enzima) y una fila de clientes (el sustrato).

1. **Baja Concentración:** Si llegan pocos clientes, el cajero los atiende inmediatamente. La velocidad de atención depende de qué tan rápido lleguen los clientes. Si llegan el doble de clientes, se atiende al doble. La relación es lineal.

2. **Alta Concentración (Saturación):** Pero, ¿qué pasa si llega una multitud gigantesca? El cajero empezará a trabajar a su máxima capacidad física. Aunque lleguen mil personas más, él no puede ir más rápido. En este punto, decimos que la enzima está saturada (Figura 23).

Este fenómeno es la base de la cinética enzimática: a bajas concentraciones de sustrato, la velocidad aumenta proporcionalmente, pero a medida que añadimos más y más sustrato, la velocidad deja de subir y se estabiliza en un máximo. La enzima simplemente no tiene "manos libres" para tomar más trabajo (Srinivasan, 2022).

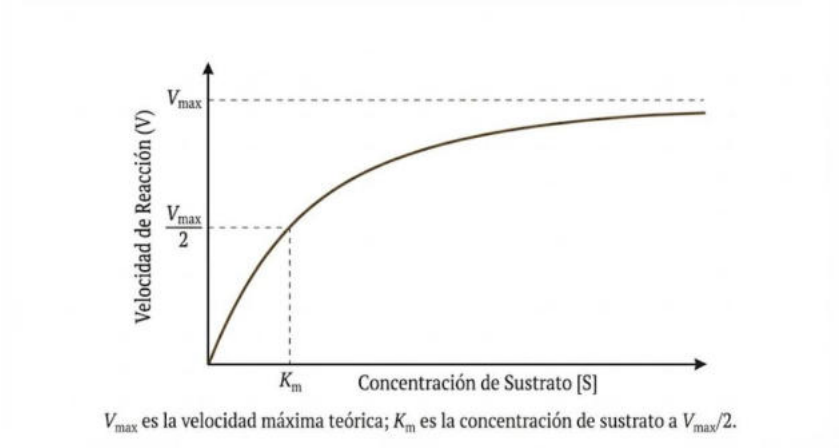



***Figura 23.Gráfico de Michaelis-Menten***

***Fuente: los autores***

La cinética de una reacción enzimática queda ilustrada en esta gráfica conforme al modelo de Michaelis-Menten: sobre el eje vertical se representa la velocidad de reacción (V) y sobre el horizontal la concentración de sustrato (S), de manera que emerge la curva hiperbólica característica con la que se denota la saturación de los sitios activos de la enzima. Dos parámetros cinéticos fundamentales resultan destacados, en concreto, la V_max (velocidad máxima teórica), asíntota hacia la cual tiende la curva cuando la enzima ya está saturada, y la constante de Michaelis (K_m), que se define gráficamente como la concentración de sustrato que hace falta para alcanzar la mitad de la velocidad máxima (V_max/2).

## El modelo de Michaelis-Menten: el mapa de la velocidad

Con el fin de describir matemáticamente ese comportamiento, los científicos Leonor Michaelis y Maud Menten formularon en 1913 un modelo que continúa siendo la piedra angular de la enzimología

moderna, el cual define, en concreto, dos parámetros clave que verás en cualquier libro, sea de medicina o de biotecnología (Kennelly et al., 2023):

- **$V_{max}$ (Velocidad Máxima):** Es el límite teórico de velocidad. Ocurre cuando todas las moléculas de enzima están ocupadas procesando sustrato (saturación total). Es la velocidad del cajero trabajando sin descanso.
- **$K_m$ (Constante de Michaelis):** Este es un indicador de la afinidad o el "cariño" que la enzima tiene por su sustrato. Se define numéricamente como la concentración de sustrato necesaria para alcanzar la mitad de la velocidad máxima (1/2 $V_{max}$).

- Un **$K_m$ pequeño** indica una enzima de gran eficiencia, puesto que le basta muy poco sustrato para trabajar a media máquina (alta afinidad).

- Un **$K_m$ grande** indica que la enzima necesita mucho sustrato para "activarse" y encontrarlo (baja afinidad) (Srinivasan, 2022)

**¿Por qué importa esto en la vida real?**

Entender estos números no es solo un ejercicio matemático; es vital para la farmacología y la medicina. Por ejemplo, muchos medicamentos funcionan inhibiendo enzimas. Saber el $K_m$ y la $V_{max}$ permite a los científicos diseñar fármacos que se unan a la enzima mejor que el sustrato natural, bloqueando procesos patológicos como la replicación de un virus o el crecimiento de un tumor (Li et al., 2020). Estudios recientes en 2025 continúan utilizando estos principios para modelar

cómo el metabolismo se adapta en enfermedades complejas como el cáncer, donde las enzimas cambian su cinética para favorecer el crecimiento celular descontrolado (Charpidou et al., 2024).

### *4.2.3 Clasificación de enzimas y factores que modulan su función*

#### Dime qué haces y te diré cómo te llamas: la clasificación enzimática

Imagina que entras en una ferretería gigante buscando una herramienta. Para no volverte loco, todo está organizado por secciones: corte, medición, sujeción, etc. Los bioquímicos han hecho exactamente lo mismo con las enzimas. Aunque existen miles de enzimas diferentes, la Unión Internacional de Bioquímica y Biología Molecular (IUBMB) las ha organizado en siete grandes familias según el tipo de reacción química que realizan. Cada enzima tiene un "código de barras" llamado número EC (Enzyme Commission) que define su identidad (Nelson et al., 2021)

Aquí te presento a las protagonistas de estas familias, las obreras especializadas de la célula, que la Tabla 5 ordena por clases:

- **Oxidorreductasas:** Son las expertas en energía. Se encargan de las reacciones de oxidación-reducción, es decir, mueven electrones de una molécula a otra. Son vitales para la respiración celular y la fotosíntesis (Lieberman & Peet, 2023).
- **Transferasas:** Son las mudanceras. Toman un grupo químico (como un fosfato o un metilo) de una molécula y lo transfieren a otra. Un ejemplo famoso son las quinasas, que pegan fosfatos para activar otras proteínas.

- **Hidrolasas:** Son las tijeras moleculares que usan agua. Rompen enlaces químicos añadiendo una molécula de agua. Son las reinas de la digestión; por ejemplo, la lactasa que rompe el azúcar de la leche es una hidrolasa (Abali et al., 2022)
- **Liasas:** Cortan enlaces igualmente (C-C, C-N, etc.), si bien lo hacen sin recurrir al agua y sin oxidar, con la formación frecuente de dobles enlaces o de anillos nuevos durante el proceso (Kennelly et al., 2023).
- **Isomerasas**: Son las ilusionistas del cambio de forma. No quitan ni ponen nada, simplemente reorganizan los átomos dentro de la misma molécula para crear un isómero diferente (como cambiar la glucosa a fructosa) (Nelson et al., 2021).
- **Ligasas:** Son el pegamento fuerte. Unen dos moléculas grandes consumiendo energía en forma de ATP. Son fundamentales para reparar y replicar tu ADN (Alberts et al., 2022)
- **Translocasas:** La familia más nueva (añadida oficialmente en 2018). Son bombas que mueven iones o moléculas a través de las membranas celulares, a menudo gastando energía.

***Tabla 5.Clasificación enzimática***

| **Clasificación enzimática** | |
|---|---|
| **Clase 1. Oxidorreductasas** | **Clase 2. Transferasas** |
| Catalizan reacciones de óxido-reducción que implican la transferencia de electrones, átomos de hidrógeno o átomos de oxígeno.<br>Ej. Peroxidasas, catalasas, oxigenasas, reductasas. | Catalizan la transferencia de un átomo o grupo funcional entre dos moléculas (donador y aceptor).<br>Ej. Aciltransferasas, quinasas, transaldolasas. |

| | |
|---|---|
| $A^{+2} + B^{+3} \rightarrow A^{+3} + B^{+2}$ | $A\text{-}X + B \rightarrow A + B\text{-}X$ |
| **Clase 3. Hidrolasas** | **Clase 4. Liasas** |
| Catalizan reacciones de hidrólisis (ruptura de enlaces con adición de agua) y su reverso.<br>Ej. Lipasas, amilasas, proteasas, nucleasas. | Participan en reacciones de eliminación en ausencia de agua, formando dobles enlaces o añadiendo grupos a un doble enlace.<br>Ej. Aldolasas, descarboxilasas. |
| $AB + H_2O \rightarrow AOH + BH$ | $A\text{-}X + B\text{-}Y \rightarrow A{=}B + XY$ |
| **Clase 5. Isomerasas** | **Clase 6. Ligasas (Sintetasas)** |
| Catalizan reacciones de isomerización y racemización (reordenamiento interno de la molécula).<br>Ej. Epimerasas, isomerasas, transferasas intramoleculares. | Catalizan la síntesis (unión) de dos moléculas formando un enlace covalente (C-X), utilizando energía de ATP.<br>Ej. Péptido sintetasas, ADN ligasas. |
| $A\text{-}X + B\text{-}Y \rightarrow Y\text{-}A\text{-}B\text{-}X$ | $A + B + ATP \rightarrow AB + ADP + P$ |

***Fuente:(Nelson et al., 2021)***

## No trabajo sola: cofactores y coenzimas

Muchas enzimas son un poco "inútiles" por sí solas; necesitan un ayudante químico para funcionar. La parte proteica inactiva se llama apoenzima, y cuando se une a su ayudante, se convierte en la holoenzima completamente funcional.

Estos ayudantes se llaman cofactores.

1. **Cofactores Inorgánicos:** Son iones metálicos simples como el hierro ($Fe^{2+}$), magnesio ($Mg^{2+}$) o zinc ($Zn^{2+}$). Por ejemplo, el ADN polimerasa necesita magnesio para copiar tu ADN correctamente (GIL, 2025)
2. **Coenzimas (Orgánicos):** Son moléculas orgánicas complejas que a menudo actúan como "taxis" temporales para electrones o grupos químicos. ¿Te suenan las vitaminas? ¡Exacto! Muchas vitaminas, especialmente las del complejo B, son precursores de coenzimas vitales como el NAD+ o la Coenzima A (Razzaque & Wimalawansa, 2025)

### ¿Quién controla el interruptor? Factores que modulan la función

Las enzimas no trabajan a ciegas; son extremadamente sensibles a su entorno. Si las condiciones cambian, su velocidad de trabajo cambia drásticamente.

Temperatura: Al igual que nosotros, las enzimas tienen una temperatura "confortable" u óptima. En los humanos, esta es cercana a los 37°C. Si hace mucho frío, se vuelven lentas porque las moléculas se mueven menos. Pero ¡cuidado con la fiebre! Si la temperatura sube demasiado, la enzima se desnaturaliza: pierde su forma 3D, se "derrite" molecularmente y deja de funcionar permanentemente (Audesirk et al., 2020)

pH (Acidez): Cada enzima tiene un pH favorito. La pepsina de tu estómago ama el ácido (pH 2), mientras que la tripsina de tu intestino prefiere un ambiente básico (pH 8). Si sacas a una enzima de su rango de pH, su estructura se altera y se apaga (GIL, 2025)

Inhibidores: Son moléculas que frenan a las enzimas. Pueden ser competitivos (se parecen al sustrato y ocupan su silla en el sitio activo) o no competitivos (se unen en otro lugar de la enzima y deforman el sitio activo para que ya no funcione). Muchos venenos y medicamentos son inhibidores potentes (Lieberman & Peet, 2023).

Un estudio reciente de 2024 en Nature Catalysis destaca cómo la biotecnología moderna está modificando genéticamente enzimas para que sean ultra-resistentes a temperaturas extremas y solventes industriales, lo que permite usarlas para reciclar plásticos de manera más eficiente, demostrando que aún estamos aprendiendo a "hackear" estos factores moduladores para salvar el planeta (Tournier et al., 2020)

## 4.2. Introducción a las aplicaciones tecnológicas de la biología

### *4.2.4 Principios básicos y la relación de la biología con las ciencias aplicadas*

**De la teoría a la acción: la biología como herramienta**

Durante siglos, los biólogos se dedicaron a describir la vida: clasificar plantas, diseccionar animales y mirar por el microscopio. Sin embargo, en las últimas décadas ha ocurrido una revolución silenciosa pero poderosa: hemos pasado de leer el código de la vida a escribirlo.

Los principios básicos que aprendiste en los capítulos anteriores, como que el ADN guarda información, las enzimas aceleran reacciones y las células son unidades funcionales, son ahora los cimientos de las Ciencias Aplicadas. La premisa es sencilla pero fascinante: si la célula es una fábrica química perfecta y eficiente, ¿por qué no usar su

maquinaria para resolver problemas humanos? Esto ha dado nacimiento a disciplinas híbridas como la biotecnología, la bioingeniería y la biología sintética, que buscan rediseñar sistemas biológicos para dotarlos de nuevas cualidades útiles para la salud, la energía y el medio ambiente (IUCN, 2024)

## El matrimonio interdisciplinario: cuando la biología conoce a la ingeniería

Lejos de trabajar sola, la biología moderna se ha fusionado con otras ciencias "duras" hasta alumbrar tecnologías que parecen ciencia ficción, una convergencia que se sostiene en la medida en que los sistemas biológicos se entienden no como misterios inescrutables, sino como sistemas susceptibles de ser modelados, cuantificados y reparados, a la manera de una máquina compleja.

- **Con la Ingeniería (Bioingeniería):** Los principios de diseño y construcción propios de la ingeniería se aplican aquí a los tejidos vivos, y un ejemplo brillante lo constituye la ingeniería de tejidos, cuyo propósito es fabricar en laboratorio órganos de reemplazo. Sumado a ello, avances recientes como la plataforma AlphaFold, reconocida entre los hitos tecnológicos más importantes de la década, recurren a la inteligencia artificial para predecir la estructura 3D de casi cualquier proteína, de manera que los ingenieros pueden diseñar nuevos fármacos y materiales biocompatibles con una precisión atómica.
- **Con la Informática (Bioinformática y Biocomputación):** El ADN es, en esencia, un sistema de almacenamiento de datos. Las nuevas tecnologías de "biocomputación" exploran el uso de

moléculas biológicas, en lugar de silicio, para procesar información. Además, la gestión de datos masivos (Big Data) es crucial hoy en día para descifrar genomas completos y entender epidemias.

- **Con la Física y la Química**: La creación de nuevos biomateriales, como plásticos biodegradables producidos por bacterias o sensores biológicos que detectan toxinas, nace de esta colaboración.

## La biología sintética: el nuevo paradigma lego

El salto acaso más grande en la relación entre biología y tecnología corresponde a la Biología Sintética, la cual, en contraste con la biotecnología tradicional, la cual "toma prestado" lo que ya existe en la naturaleza, aspira a construir desde cero nuevos componentes biológicos.

Imagina que los genes son piezas de LEGO estandarizadas (llamadas BioBricks). Los científicos pueden ahora ensamblar estas piezas para crear circuitos genéticos que no existen en la naturaleza. Por ejemplo, se están diseñando bacterias con circuitos lógicos que funcionan como pequeños ordenadores: pueden detectar una célula cancerosa en el cuerpo, "encender" un gen terapéutico para destruirla y luego autodestruirse cuando terminan el trabajo. Este enfoque de ingeniería racional está revolucionando la medicina personalizada y la producción industrial sostenible (IUCN, 2024; Rice et al., 2025)

## Impacto en la vida diaria: más allá del laboratorio

Esta relación entre ciencias básicas y aplicadas ya está en tu vida cotidiana, a menudo sin que lo notes:

- Salud: Las vacunas de ARN mensajero (como las de COVID-19) son un triunfo de la biología molecular aplicada. Enseñan a tus células a fabricar una proteína viral inofensiva para entrenar a tu sistema inmune, una estrategia mucho más segura y rápida que los métodos antiguos (Cheong & Apblett, 2022)
- Alimentación: La "agricultura celular" está empezando a producir carne cultivada en laboratorio a partir de células animales, sin necesidad de sacrificar ganado, lo que promete reducir drásticamente el impacto ambiental de nuestra dieta (*Avances en biotecnología | EFSA*, 2024)
- Medio Ambiente: Se están utilizando microorganismos modificados para "comer" plástico o limpiar derrames de petróleo, aplicando rutas metabólicas rediseñadas para la biorremediación (Tournier et al., 2020)

### *4.2.5 Conceptos de enzimas inmovilizadas*

**El ingenio biotecnológico: atornillando la enzima al proceso**

En el ámbito industrial, el uso de enzimas libres o solubles (tal como se encuentran en una solución) presenta desafíos logísticos y económicos significativos. Son costosas de producir, difíciles de recuperar del medio de reacción una vez terminado el proceso y, peor aún, son sensibles a las condiciones operativas adversas de los biorreactores (temperatura,

pH, disolventes, etc.). La solución que revolucionó la biocatálisis industrial fue la Inmovilización Enzimática (Espinoza et al., 2023).

**Definición:** Las enzimas inmovilizadas son enzimas que han sido confinadas o localizadas en una región específica de un material de soporte inerte (una matriz, un polímero o una superficie sólida), permitiendo que conserven su actividad catalítica mientras se vuelven insolubles o fijas dentro del sistema (de la Fuente Martínez, 2024; Maghraby et al., 2023)

Este confinamiento transforma un sistema catalítico homogéneo (enzima en solución) en un sistema heterogéneo (enzima fija), lo que ofrece una serie de ventajas operacionales cruciales para la rentabilidad de un proceso industrial.

**Ventajas operacionales y económicas clave**

La inmovilización de enzimas es una herramienta poderosa que no solo resuelve problemas de escalabilidad, sino que a menudo mejora las propiedades intrínsecas del biocatalizador (Cacho Salán, 2020; Espinoza et al., 2023):

- Reutilización y Reducción de Costos: Al estar fijas, las enzimas pueden ser recuperadas fácilmente (simplemente filtrando o retirando el soporte) y reutilizadas en múltiples ciclos de reacción. Esto reduce drásticamente los costos de producción, un factor clave para la viabilidad económica.
- Aumento de la Estabilidad: El confinamiento en un soporte a menudo confiere mayor rigidez conformacional a la enzima, aumentando su resistencia a la desnaturalización

térmica, a los cambios de pH y a los disolventes orgánicos (Cacho Salán, 2020)

- Facilidad de Separación: El producto final queda libre de proteínas enzimáticas, lo que simplifica enormemente los procesos de purificación y downstream processing (procesamiento posterior) (Espinoza et al., 2023)
- Procesos Continuos: La inmovilización permite el uso de reactores enzimáticos de flujo continuo (como reactores de lecho fijo o lecho fluidizado), que son mucho más eficientes y escalables que los procesos por lotes.

## Métodos de inmovilización: la caja de herramientas del bioingeniero

La elección del método de inmovilización depende de la enzima, el soporte y la aplicación final, buscando siempre maximizar la actividad y la estabilidad (Shekhar et al., 2020).Los métodos se agrupan en dos categorías principales:

***Tabla 6.Clasificación del método de inmovilización enzimática***

| Categoría | Método Principal | Mecanismo | Ventajas | Desventajas/Retos |
|---|---|---|---|---|
| **Unión Física** | 1. Adsorción | Fijación superficial (fuerzas de Van der Waals, electrostáticas, puentes de hidrógeno) | Simple, bajo costo, no afecta la estructura nativa de la enzima. | Posibilidad de desorción (fuga de la enzima) en condiciones cambiantes (pH, temperatura). |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | sobre un soporte (e.g., carbón activado, resinas). | | |
| **Unión Química** | 2. Atrapamiento /Encapsulación | La enzima es confinada dentro de la red o matriz porosa de un gel o polímero (e.g., alginato de calcio, quitosano, hidrogeles). | No implica modificación química de la enzima, alta capacidad de carga. | Problemas de difusión: el sustrato tarda en entrar y el producto en salir (limitación de masa). |
| | 3. Unión Covalente | Formación de enlaces químicos fuertes entre grupos funcionales de la enzima (aminos, carboxilos) y el soporte activado. | Enlaces muy estables, ausencia de fuga de la enzima, alta rigidez estructural. | Cuando el enlace se forma sobre un residuo esencial, el sitio activo de la enzima puede resultar alterado, lo que exige reactivos químicos. |
| | 4. Entrecruzamiento (Cross-linking) | Unión directa de las moléculas de enzima entre sí usando | Alta pureza catalítica. | Riesgo de pérdida de actividad por agregación desordenada de la enzima |

| |
|---|
| agentes bifuncionales, formando agregados sin un soporte externo. |

***Fuente: Espinoza et al., (2023)***

## Aplicaciones: donde el lego de enzimas fijas trabaja

Las enzimas inmovilizadas son esenciales en múltiples sectores, demostrando el valor de la Biotecnología Aplicada (Rodríguez-Muñoz et al., 2024):

- Industria Alimentaria: Producción de jarabe de glucosa a partir de almidón (usando glucoamilasa inmovilizada), elaboración de quesos y modificación de grasas y aceites.
- Medicina y Diagnóstico: Componente central de los biosensores. Por ejemplo, la glucosa oxidasa inmovilizada se utiliza en los medidores de glucosa para diabéticos, donde la inmovilización garantiza una vida útil y estabilidad prolongadas (Cacho Salán, 2020).
- Farmacéutica y Química: Síntesis de compuestos enantioméricamente puros (moléculas con alta especificidad), cruciales en la producción de antibióticos y otros fármacos (Espinoza et al., 2023).
- Medio Ambiente (Biorremediación): Uso de enzimas inmovilizadas, como lipasas o lacasas, para la degradación de contaminantes específicos en aguas residuales industriales,

permitiendo su reutilización en sistemas de tratamiento (Rodríguez-Muñoz et al., 2024)

## 4.3. Biotecnología y enzimas en la industria

### *4.2.6 Aplicaciones de enzimas en la industria (énfasis en la alimentaria)*

Las enzimas son las catalizadoras biológicas más eficientes que conocemos. Como hemos visto, la inmovilización resolvió el problema de su escalabilidad, llevándolas de la escala del laboratorio a la escala de la fábrica. Actualmente, las enzimas son pilares de la biotecnología industrial (a menudo llamada "biotecnología blanca"), ya que reemplazan a los procesos químicos agresivos (que requieren alta temperatura, presión y disolventes tóxicos) por reacciones suaves, específicas y ambientalmente amigables (Tournier et al., 2020)

Veamos dónde se aplican estas "obreras" moleculares, con un énfasis especial en el sector de la alimentación.

**El rol protagonista en la industria alimentaria**

La industria alimentaria es, históricamente, la primera y más grande consumidora de enzimas. Desde la fermentación del pan y la cerveza, que se basa en las enzimas de la levadura, hasta los procesos modernos de modificación de lácteos, las enzimas son la clave de la textura, el sabor y la vida útil de muchos productos (Lieberman & Peet, 2023)

**Industria láctea**

- Cuajo/Quimosina (Hidrolasa): La enzima más famosa. Es esencial para la fabricación de quesos. Rompe las proteínas de la leche (caseínas), haciendo que precipiten y se separen del suero (Nelson et al., 2021). Hoy en día, la mayor parte de la quimosina utilizada no proviene del estómago de terneros, sino de microorganismos modificados genéticamente, un triunfo de la biotecnología.
- Lactasa (Hidrolasa): Rompe el azúcar lactosa en glucosa y galactosa, azúcares más fáciles de digerir. Esta enzima es crucial para producir leche y lácteos sin lactosa para personas intolerantes.

**Panadería y harinas**

- Amilasas (Hidrolasas): Ayudan a descomponer el almidón de la harina en azúcares más simples. Esto no solo alimenta a la levadura (mejorando la fermentación y el volumen del pan), sino que también mejora el color de la corteza y retarda el envejecimiento del pan (Audesirk et al., 2020)
- Proteasas (Hidrolasas): Modifican las proteínas del gluten y regulan con ello la elasticidad y la dureza de la masa, de manera que resultan galletas más crujientes o masas industriales más maleables.

**Bebidas y zumos**

- Pectinasas (Hidrolasas): Estas enzimas degradan la pectina, un componente de las paredes celulares de las frutas. Su uso

ayuda a clarificar los zumos (eliminando la turbidez), mejora la extracción de jugo de la pulpa y estabiliza el color.

**Aplicaciones en otros sectores industriales**

El poder de las enzimas va mucho más allá de la cocina y tiene un impacto masivo en otros sectores (Espinoza et al., 2023):

Detergentes y Limpieza: ¿Has visto esos detergentes que dicen "Contiene enzimas activas"? Estas son proteasas, amilasas y lipasas diseñadas para funcionar a bajas temperaturas. Su trabajo es descomponer manchas orgánicas difíciles (proteínas de huevo, grasas) en fragmentos solubles, mejorando drásticamente la eficacia del lavado (Tournier et al., 2020)

Textil y Cuero: Se usan enzimas para procesos de acabado de tejidos. Por ejemplo, las celulasas se utilizan para el "deslavado" (o stonewash) del jean de mezclilla, dándole un aspecto suave y desgastado sin el daño ambiental que causaban los procesos químicos anteriores.

Farmacéutica y Química Fina: Las enzimas actúan como catalizadores altamente específicos para la síntesis de moléculas quirales (moléculas con orientación específica) y la producción de antibióticos y vitaminas. Esta especificidad reduce la creación de subproductos indeseados (Kennelly et al., 2023)

Biocombustibles y Energía: En la producción de biocombustibles de segunda generación las enzimas resultan cruciales, por cuanto descomponen la celulosa de los residuos vegetales (biomasa) en azúcares fermentables destinados a obtener bioetanol, un proceso que a

escala productiva transcurre en biorreactores industriales como el de la Figura 24.

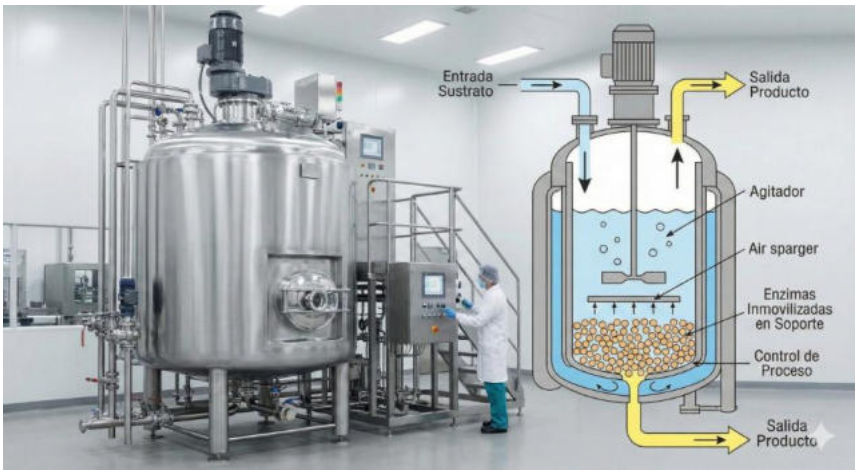



***Figura 24.Biorreactor industrial***

***Fuente: los autores***

La siguiente imagen ejemplifica un biorreactor industrial (un gran fermentador de acero inoxidable), que represente el lugar donde se producen y utilizan las enzimas a escala masiva, conectando así el concepto de inmovilización con la producción real.

Este panorama demuestra que, gracias al conocimiento molecular, las enzimas han pasado de ser meros componentes celulares a ser herramientas de ingeniería química de alta precisión, impulsando la sostenibilidad y la eficiencia en la producción industrial (*Avances en biotecnología | EFSA*, 2024)

### *4.2.7 Técnicas fundamentales de purificación de enzimas*

**Separando la paja del grano: el imperativo de la pureza**

Fuentes biológicas complejas proveen la mayoría de las enzimas: microorganismos cultivados (Escherichia coli, levaduras), tejidos vegetales o animales, de manera que, al romperse esas células, queda liberada una mezcla heterogénea con miles de proteínas (la enzima objetivo, junto a proteínas estructurales, enzimas no deseadas, ácidos nucleicos y lípidos).

Purificar una enzima persigue como propósito aislar la proteína de interés con la pureza más alta posible y el mejor rendimiento (cantidad de enzima activa recuperada), dentro de un proceso serial y gradual en el cual cada etapa explota una propiedad fisicoquímica distinta de la enzima objetivo.

El proceso de purificación típicamente sigue esta secuencia:

- **Extracción Bruta:** Romper las células o tejidos (homogenización) para liberar el contenido enzimático al medio (lisis).
- **Fraccionamiento (Separación Masiva):** Separación gruesa de la enzima respecto de contaminantes de gran tamaño (ácidos nucleicos, orgánulos, lípidos) y del resto de proteínas.
- **Cromatografía (Separación de Alta Resolución):** El corazón de la purificación, donde se aíslan las proteínas con gran precisión.
- **Análisis de Pureza y Actividad:** Cuantificación del grado de aislamiento y de la función enzimática.

**Fraccionamiento por solubilidad: el salting out**

Durante la primera etapa del fraccionamiento a gran escala se aprovecha la solubilidad diferencial de las proteínas, procedimiento que recibe el nombre de precipitación salina o salting out.

- Principio: La solubilidad de una proteína queda determinada por la cantidad de sal presente en el medio, de manera que a bajas concentraciones los iones salinos favorecen que permanezca disuelta (efecto salting in). Cuando esa concentración se eleva con una sal como el sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$), los iones pasan a competir con las proteínas por las moléculas de agua, y una vez que el agua ha sido "secuestrada" por la sal, las interacciones proteína-proteína hidrofóbicas pasan a dominar, lo que fuerza a las proteínas a agregarse y precipitar.
- Procedimiento: Concentraciones crecientes de sulfato de amonio, aplicadas de forma gradual, por ejemplo entre el 20% y el 40% de saturación, permiten "sacar" por etapas distintos grupos de proteínas de la solución, de modo que el bioquímico se queda con la fracción de concentración salina donde reside la enzima deseada y descarta el resto.

**La columna de separación: técnicas cromatográficas avanzadas**

La cromatografía es la herramienta de elección para lograr la alta pureza final. Todas las técnicas cromatográficas se basan en el mismo principio: una fase estacionaria (una matriz o resina empacada en una columna) interactúa con una fase móvil (la solución de proteína que se hace pasar a través de la columna), separando las moléculas con base en alguna de sus propiedades (Nelson et al., 2021)

**Cromatografía de intercambio iónico**

- Principio: La separación obedece a la carga neta de las proteínas y a su afinidad por la matriz, cuya fase estacionaria porta grupos cargados positiva o negativamente, de manera que en una matriz aniónica quedan retenidas únicamente las proteínas catiónicas (con carga positiva).
- Elución: Las proteínas retenidas se liberan o eluyen cuando se modifica el pH del medio o se incrementa la fuerza iónica (concentración de sal), con lo que las interacciones electrostáticas entre la proteína y la matriz quedan rotas.

**Cromatografía de exclusión por tamaño o gel filtración**

- Principio: El tamaño molecular (masa molecular) rige aquí la separación de las proteínas, y la fase estacionaria consiste en un gel poroso, semejante a bolitas de polímeros.
- Separación: Las proteínas pequeñas se quedan "atrapadas" en los poros del gel y tardan más en salir de la columna, mientras que las proteínas grandes pasan de largo rápidamente por los espacios intermedios. Es una técnica excelente para estimar el peso molecular de la enzima.

**Cromatografía de afinidad**

- Principio: Se trata del método más poderoso y específico, y descansa en una interacción biológica única entre la enzima y un ligando determinado; en concreto, la fase estacionaria recibe una modificación química para que incorpore un

ligando que se une en exclusiva a la enzima de interés, sea el sustrato, un inhibidor o un cofactor de la propia enzima.

- Elución: Mientras la enzima queda unida a la matriz, las demás proteínas contaminantes la atraviesan sin retenerse; la enzima se libera mediante la adición de una solución de elevada concentración de ligando libre, que compite por el sitio de unión y la obliga a abandonar la matriz.

**Verificación final: la electroforesis**

Una vez completada la purificación, el grado de pureza alcanzado se evalúa mediante la electroforesis en gel, típicamente en su modalidad SDS-PAGE.

- Principio: El tratamiento de las proteínas purificadas con el detergente SDS (dodecilsulfato de sodio) las desnaturaliza y les confiere una carga negativa uniforme, tras lo cual se las hace migrar por un gel poroso bajo un campo eléctrico.
- Resultado: Las proteínas se separan exclusivamente por su tamaño. Si la purificación fue exitosa, el gel mostrará una banda única y muy intensa en el carril donde se cargó la enzima, confirmando que casi la totalidad de la muestra es la proteína de interés (Abali et al., 2022)

El dominio de estas técnicas permite a los bioingenieros y bioquímicos aislar enzimas con purezas superiores al 95% y con actividades catalíticas optimizadas para su uso en los procesos industriales y biosensores de vanguardia.

### *4.2.8 Producción y relevancia industrial de enzimas*

**La máquina de hacer enzimas: producción a gran escala**

Para que las enzimas sean económicamente viables en sectores como el alimentario o el farmacéutico, deben producirse en cantidades masivas, purificarse (4.3.2) y, a menudo, inmovilizarse (4.2.2). El proceso industrial de producción de enzimas es un testimonio de la fusión entre biología, ingeniería y genética, que se basa en la fermentación biotecnológica.

A. La Fuente del Biocatalizador: El primer paso es seleccionar el organismo fuente. Aunque algunas enzimas se obtienen de plantas o animales (como el cuajo tradicional), la inmensa mayoría de las enzimas comerciales provienen de microorganismos (bacterias, hongos y levaduras). Las ventajas de usar microorganismos son claras (Cheong & Apblett, 2022):

- Crecimiento Rápido: Permiten una producción rápida y constante.
- Cultivo Sencillo: Se cultivan en grandes volúmenes con medios simples.
- Ingeniería Genética: Son fácilmente modificables para aumentar la producción o mejorar las características de la enzima.

B. Ingeniería Genética para la Hiperproducción: El éxito moderno descansa en la clonación y la expresión heteróloga; en concreto, el gen que codifica la enzima deseada, por ejemplo una lipasa capaz de degradar grasas, se extrae de su organismo original para insertarse en un microorganismo "huésped" de elevado rendimiento, tal como la bacteria *E. coli* o la levadura *Pichia pastoris*. Ese microorganismo modificado

funciona, en esencia, como una pequeña fábrica genética concebida para rendir grandes cantidades de una sola enzima purificable.

C. Fermentación Industrial: La producción real ocurre dentro de grandes contenedores sellados de acero inoxidable llamados biorreactores o fermentadores.

En estos sistemas, se mantienen estrictamente controladas variables como:

- Nutrientes: El medio de cultivo que alimenta a los microorganismos.
- Temperatura y pH: Para asegurar condiciones óptimas de crecimiento.
- Oxígeno y Agitación: Para mantener la uniformidad y el suministro de oxígeno, esencial para el metabolismo microbiano.

Una vez finalizado el ciclo de producción, el caldo de fermentación (que contiene la enzima) pasa a la fase de downstream processing (procesamiento posterior) que incluye la lisis celular y las técnicas de purificación hasta obtener la enzima en su forma comercial.

**La relevancia trascendental de las enzimas industriales**

La creciente demanda de enzimas en el mercado global refleja su rol como catalizadores del progreso industrial sostenible.

**A. Beneficio económico y operacional:** Como se mencionó en el punto 4.2.2, la capacidad de las enzimas inmovilizadas de ser reutilizadas

durante cientos de ciclos, junto con su mayor estabilidad operacional, transforma un insumo costoso en un activo recuperable, disminuyendo significativamente los costos operativos totales (Espinoza et al., 2023)

**B. Impulso a la Sostenibilidad (Química Verde):** Este es el factor de relevancia más crucial en el siglo XXI. Las enzimas permiten la transición de procesos químicos tradicionales a la química verde (Rodríguez-Muñoz et al., 2024):

- Condiciones Suaves: Su funcionamiento transcurre a temperaturas y presiones bajas, próximas a las ambientales, con la consiguiente reducción del consumo energético.
- Menos Residuos: La elevada especificidad y selectividad impiden que se formen subproductos tóxicos o indeseados, de manera que disminuye la generación de residuos peligrosos.
- Biorremediación: La ingeniería enzimática permite crear soluciones para el reciclaje de materiales (como la degradación de plásticos mediante enzimas modificadas, como las PETasas) y el tratamiento de aguas contaminadas (Tournier et al., 2020)

**C. Innovación en Salud y Diagnóstico:** La producción a gran escala de enzimas ultra-puras es esencial para el desarrollo de la medicina de precisión. Desde la fabricación de reactivos de diagnóstico (como las polimerasas para PCR o las enzimas para biosensores) hasta la producción de biofármacos y terapias génicas, la industria enzimática es un motor fundamental de la innovación biomédica (Abali et al., 2022)

En suma, la enzima transitó desde un simple concepto molecular hasta convertirse en una herramienta biotecnológica indispensable que, mediante las técnicas de producción, purificación e inmovilización, favorece a escala global tanto la eficiencia económica como la responsabilidad ambiental.

## 4.3 Elementos de cierre

Catálisis Vital: En ausencia de enzimas, las reacciones metabólicas resultarían demasiado lentas para sostener la vida, y en su especificidad y regulación reside el control fino de la célula.

Cinética y Regulación: La actividad enzimática resulta medible y modulable, de modo que comprender su saturación (Vmax) y su afinidad (Km) es clave para diseñar fármacos e inhibidores.

Ingeniería Enzimática: La inmovilización ha permitido llevar las enzimas del laboratorio a la fábrica, creando biocatalizadores robustos y reutilizables.

Biología Sintética: Hemos entrado en una era en la que la biología no solo se utiliza, sino que se construye (BioBricks), y ofrece soluciones sostenibles para problemas globales.

Este capítulo no solo cierra el texto, sino que abre la puerta al futuro profesional del estudiante. Hemos recorrido el camino desde el átomo hasta la biotecnología industrial. La comprensión integral de la Arquitectura y dinámica de la vida, desde la estructura celular hasta el control enzimático, es la base sobre la cual se construirán las innovaciones en salud, alimentación y medio ambiente del mañana.

## 4.4 Actividades de aprendizaje

- Gráficas de Cinética: Proporcionar datos experimentales simulados que relacionen la velocidad de reacción con la concentración de sustrato; los estudiantes han de graficar la curva, estimar Vmax y Km, y anticipar cómo variaría esa curva al añadir un inhibidor competitivo.
- Diseño de un Proceso Industrial: Plantear un problema, por ejemplo "Queremos producir leche deslactosada a bajo costo", ante el cual los estudiantes han de proponer un sistema con lactasa inmovilizada y justificar qué tipo de soporte y reactor emplearían.
- Investigación de "Etiquetas Inteligentes": Buscar en casa productos, como detergentes y alimentos procesados, cuya etiqueta declare enzimas, para averiguar después de qué enzima se trata (proteasa, amilasa, etc.) y cuál es su función concreta en ese producto.
- Debate Ético en Biotecnología: Discutir la modificación genética de microorganismos destinada a producir enzimas, como la quimosina transgénica, y contrastar sus beneficios (no sacrificar terneros, pureza) con las preocupaciones públicas acerca de los OGM.
- Simulación de Factores Moduladores: Siempre que resulte viable en el laboratorio o de forma virtual, medir la actividad de la catalasa con hígado o papa y agua oxigenada a distintas temperaturas (hielo, ambiente, hervido), y explicar la desnaturalización que se observa con el calor extremo.

## BIBLIOGRAFÍA

Abali, E. E., Cline, S. D., Franklin, D. S., Viselli, S. M., & Abali, E. E. (2022). Lippincott Illustrated Reviews: Biochemistry (Eighth edition, international edition). Wolters Kluwer.

Ahsan, M., Sami, A., Haider, M., & Meeran, M. (2023). CENTRAL DOGMA OF MOLECULAR BIOLOGY: FROM DNA TO PROTEIN SYNTHESIS. Journal of Physical, Biomedical and Biological Sciences, 2023(1), 7. https://doi.org/10.64013/jpbab.v2023i1.7

Alberts, B. (with Hopkin, K., Johnson, A., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P.). (2021). Introducción a la biología celular: 5a edición. Editorial Medica Panamericana.

Alberts, B., Heald, R., Johnson, A., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., Walter, P., Wilson, J. H., & Hunt, T. (2022). Molecular biology of the cell (Seventh edition, international student edition). W. W. Norton & Company.

Aleksandrova, M., & Bonfio, C. (2022). Bioenergetics of early life: Coupling of reaction networks and compartments may have sparked the first life forms. EMBO Reports, 23(8), e55679. https://doi.org/10.15252/embr.202255679

Audesirk, T., Audesirk, G., & Byers, B. E. (2020). Biology: Life on earth with physiology (Twelfth edition). Pearson.

Avances en biotecnología | EFSA. (2024, diciembre 18). https://www.efsa.europa.eu/es/topics/advances-biotechnology

Billman, G. E. (2020). Homeostasis: the underappreciated and far too often ignored central organizing principle of physiology. Frontiers in Physiology, 11, 200. https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00200

Cacho Salán, B. (2020). Recientes avances y aplicaciones de la enzima glucosa oxidasa inmovilizada por unión covalente. https://uvadoc.uva.es/handle/10324/45283

Calabrese, S., Chakrawal, A., Manzoni, S., & Van Cappellen, P. (2021). Energetic scaling in microbial growth. Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(47), e2107668118. https://doi.org/10.1073/pnas.2107668118

Chang, R., & Overby, J. (2020). Química (G. Nagore Cázares & S. A. Sarmiento Ortega, Trads.; 13a edición). McGraw-Hill.

Charpidou, A., Gerotziafas, G., Popat, S., Araujo, A., Scherpereel, A., Kopp, H.-G., Bironzo, P., Massard, G., Jiménez, D., Falanga, A., Kollias, A., & Syrigos, K. (2024). Lung Cancer Related Thrombosis (LCART): Focus on Immune Checkpoint Blockade. Cancers, 16(2), 450. https://doi.org/10.3390/cancers16020450

Cheong, K. Y., & Apblett, A. (Eds.). (2022). Sustainable materials and green processing for energy conversion. Elsevier.

Cooper, G. M. (2022). La célula (8a ed). Marbán.

Cossetto, T., Rodenfels, J., & Sartori, P. (2025). Thermodynamic dissipation constrains metabolic versatility of unicellular growth. Nature Communications, 16(1), 8543. https://doi.org/10.1038/s41467-025-62975-5

de la Fuente Martínez, F. (2024). Inmovilización y almacenamiento de enzimas en materiales 3D para aplicaciones biotecnológicas. http://dspace.umh.es/handle/11000/33136

Espinoza, R. G., Céspedes, R. I. N., Alonso, M. C. I., Facio, A. O. C., Iliná, A., & Cortés, L. F. M. (2023). Avances en la inmovilización de enzimas sobre superficies poliméricas y sus diferentes aplicaciones en la industria. Cienciacierta, 19(76), 99-130.

Freeman, S. (2022). Biological science (Seventh Edition). 2020.

Galgani, J. E., Bergouignan, A., Rieusset, J., Moro, C., & Nazare, J.-A. (2022). Editorial: Metabolic Flexibility. Frontiers in Nutrition, 9, 946300. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.946300

Garritano, A. N., Song, W., & Thomas, T. (2022). Carbon fixation pathways across the bacterial and archaeal tree of life. PNAS Nexus, 1(5), pgac226. https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgac226

GIL. (2025). Gil. Tratado de Nutrición: Nutrición Humana en el Estado de Salud. Tomo 4 - 4a ed. Editorial Médica Panamericana.

Griffiths, A. J. F., Doebley, J. F., Peichel, C., & Wassarman, D. A. (2020). Introduction to genetic analysis (Twelfth edition). W.H. Freeman & Company/Macmillan Learning.

Harper bioquímica ilustrada (32a edición) (with Kennelly, P. J., & Rodwell, V. W.). (2024). McGraw Hill Interamericana.

Hubenov, V., Varbacheva, I., & Kabaivanova, L. (2024). Impact of Waste Cooking Oils Addition on Thermophilic Dry Co-Digestion of Wheat Straw and Horse Manure for Renewable Energy Production in Two Stages. Life, 14(3), 312. https://doi.org/10.3390/life14030312

IUCN. (2024). Biología sintética en relación con la conservación de la naturaleza: Documento informativo (1.a ed.). IUCN, International Unio for Conservation of Nature. https://doi.org/10.2305/CEOK3018

Iwasa, J., Marshall, W. F., & Karp, G. (2020). Karp's cell and molecular biology: Concepts and experiments (Ninth edition). Wiley.

Jacquemet, G., Carisey, A. F., Hamidi, H., Henriques, R., & Leterrier, C. (2020). The cell biologist's guide to super-resolution microscopy. Journal of Cell Science, 133(11), jcs240713. https://doi.org/10.1242/jcs.240713

Kennelly, P. J., Botham, K. M., McGuinness, O. P., Rodwell, V. W., & Weil, P. A. (Eds.). (2023). Harper's illustrated biochemistry (Thirty-second edition). McGraw-Hill LLC.

Li, J., Song, Y., Liu, X., & Pan, J. (2025). Cutaneous Granuloma Resulting from Mixed Infection with Mycobacterium marinum and Candida metapsilosis: A Case Report of Successful Treatment. Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology, Volume 18, 1213-1218. https://doi.org/10.2147/CCID.S520618

Li, Q., Chen, Q., Klauser, P. C., Li, M., Zheng, F., Wang, N., Li, X., Zhang, Q., Fu, X., Wang, Q., Xu, Y., & Wang, L. (2020). Developing Covalent Protein Drugs via Proximity-Enabled Reactive Therapeutics. Cell, 182(1), 85-97.e16. https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.05.028

Lieberman, M., & Peet, A. (with Chansky, M.). (2023). Marks' basic medical biochemistry: A clinical approach (Sixth edition. International edition). Wolters Kluwer Health.

Lodish, H. F., Berk, A., Kaiser, C., Krieger, M., Bretscher, A., Ploegh, H. L., Martin, K. C., Yaffe, M. B., & Amon, A. (2021). Molecular cell biology (Ninth edition, loose-leaf student edition). Macmillan Learning.

Mader, S. S., & Windelspecht, M. (2022). Biology (Fourteenth Edition). McGraw.

Maghraby, Y. R., El-Shabasy, R. M., Ibrahim, A. H., & Azzazy, H. M. E.-S. (2023). Enzyme Immobilization Technologies and Industrial Applications. ACS Omega, 8(6), 5184-5196. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07560

Mason, K. A., Losos, J. B., & Duncan, T. (2020). Biology (Twelfth edition). McGraw-Hill Education.

Minerales en la dieta. (s. f.). [Text]. National Library of Medicine. Recuperado 22 de diciembre de 2025, de https://medlineplus.gov/spanish/minerals.html

Miniero, D. V. (2025). Membrane Proteins: New Insights into Structure, Metabolic Functions and Disease-Relevant Mutations. Frontiers in Bioscience-Landmark, 30(7), 40081. https://doi.org/10.31083/FBL40081

Mohidem, N. A., Mohamad, M., Rashid, M. U., Norizan, M. N., Hamzah, F., & Mat, H. B. (2023). Recent Advances in Enzyme Immobilisation Strategies: An Overview of Techniques and Composite Carriers. Journal of Composites Science, 7(12), 488. https://doi.org/10.3390/jcs7120488

Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2021). Principles of Biochemistry (8th ed). W.H. Freeman & Company.

Nelson, D. L., Cox, M. M., Hoskins, A. A., & Lehninger, A. L. (2021). Lehninger principles of biochemistry (Eighth edition). Macmillan International Higher Education.

Niebel, B., Leupold, S., & Heinemann, M. (2019). An upper limit on Gibbs energy dissipation governs cellular metabolism. Nature Metabolism, 1(1), 125-132. https://doi.org/10.1038/s42255-018-0006-7

Ostojic, S. M. (2024). Clinical Bioenergetics: Understanding the Interplay Between Energy Metabolism and Human Health. Clinical Bioenergetics, 1(1), 1. https://doi.org/10.3390/clinbioenerg1010001

Papastavrou, N., Horning, D. P., & Joyce, G. F. (2024). RNA-catalyzed evolution of catalytic RNA. Proceedings of the National Academy of Sciences, 121(11), e2321592121. https://doi.org/10.1073/pnas.2321592121

Pouliquen, D. L. (2024). The biophysics of water in cell biology: Perspectives on a keystone for both marine sciences and cancer research. Frontiers in Cell and Developmental Biology, 12, 1403037. https://doi.org/10.3389/fcell.2024.1403037

Powers, S. K., Howley, E. T., & Quindry, J. (2024). Exercise physiology: Theory and application to fitness and performance (Twelfth edition). McGraw Hill.

Raymond, J. L., & Morrow, K. (2021). Krause, Mahan, dietoterapia (15a. ed). Elsevier.

Razzaque, M. S., & Wimalawansa, S. J. (2025). Minerals and Human Health: From Deficiency to Toxicity. Nutrients, 17(3), 454. https://doi.org/10.3390/nu17030454

Ribatti, D. (2018). An historical note on the cell theory. Experimental Cell Research, 364(1), 1-4. https://doi.org/10.1016/j.yexcr.2018.01.038

Rice, A. J., Sword, T. T., Chengan, K., Mitchell, D. A., Mouncey, N. J., Moore, S. J., & Bailey, C. B. (2025). Cell-free synthetic biology for natural product biosynthesis and discovery. Chemical Society Reviews, 54(9), 4314-4352. https://doi.org/10.1039/D4CS01198H

Rodríguez-Muñoz, S., Guerra-Álvarez, B., Guerrero-Alcívar, M. S., & Caicedo-Arévalo, O. E. (2024). Empleo de enzimas inmovilizadas para el tratamiento de residuales líquidos. 58(1).

Shekhar, H., Kant, G., Tripathi, R., Sharma, S., Mani, A., Singh, N. K., & Srivastava, S. (2020). Structural insight of two 4-Coumarate CoA ligase (4CL) isoforms in Leucaena suggests targeted genetic manipulations could lead to better lignin extractability from the pulp. 3 Biotech, 10(9), 383. https://doi.org/10.1007/s13205-020-02375-2

Srinivasan, B. (2022). A guide to the Michaelis–Menten equation: Steady state and beyond. The FEBS Journal, 289(20), 6086-6098. https://doi.org/10.1111/febs.16124

TeSlaa, T., Ralser, M., Fan, J., & Rabinowitz, J. D. (2023). The pentose phosphate pathway in health and disease. Nature Metabolism, 5(8), 1275-1289. https://doi.org/10.1038/s42255-023-00863-2

Tournier, V., Topham, C. M., Gilles, A., David, B., Folgoas, C., Moya-Leclair, E., Kamionka, E., Desrousseaux, M.-L., Texier, H., Gavalda, S., Cot, M., Guémard, E., Dalibey, M., Nomme, J., Cioci, G., Barbe, S., Chateau, M., André, I., Duquesne, S., &

Marty, A. (2020). An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. Nature, 580(7802), 216-219. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2149-4

Toward Sequencing and Mapping of RNA Modifications Committee, Board on Life Sciences, Board on Health Sciences Policy, Division on Earth and Life Studies, Health and Medicine Division, & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2024). Charting a Future for Sequencing RNA and Its Modifications: A New Era for Biology and Medicine (p. 27165). National Academies Press. https://doi.org/10.17226/27165

Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., Orr, R. B., & Campbell, N. A. (2021). Campbell biology (Twelfth edition). Pearson.

Vandekeere, A., El Kharraz, S., Altea-Manzano, P., & Fendt, S.-M. (2024). Metabolic Rewiring During Metastasis: The Interplay Between the Environment and the Host. Annual Review of Cancer Biology, 8(1), 269-290. https://doi.org/10.1146/annurev-cancerbio-062822-122840

Zeng, Z., Huang, Q., Mao, L., Wu, J., An, S., Chen, Z., & Zhang, W. (2021). The Pyruvate Dehydrogenase Complex in Sepsis: Metabolic Regulation and Targeted Therapy. Frontiers in Nutrition, 8, 783164. https://doi.org/10.3389/fnut.2021.783164

Zhang, Z. (2023). Importance of Anabolism and Catabolism in Cellular Energy Metabolism. Biology and Medicine, 15(10), 1-1. https://doi.org/10.35248/0974-8369.23.15.616

Zhukov, A., & Popov, V. (2023). Eukaryotic Cell Membranes: Structure, Composition, Research Methods and Computational Modelling. International Journal of Molecular Sciences, 24(13), 11226. https://doi.org/10.3390/ijms241311226

Zulueta Diaz, Y. D. L. M., & Arnspang, E. C. (2024). Super-resolution microscopy to study membrane nanodomains and transport mechanisms in the plasma membrane. Frontiers in Molecular Biosciences, 11, 1455153. https://doi.org/10.3389/fmolb.2024.1455153

**Biología: composición, función y regulación de los seres vivos,** se publicó en el mes de noviembre de 2026.

**ISBN: 978-9907-802-47-4**

**Grupo Editorial BLR**
**Ecuador**
**Cel: +593 98 320 4362**
**https://grupoblr.com/**
**publicaciones@grupoblr.com**

# BIOGRAFÍA DE AUTORES

**Cristhian Arturo Zambrano Cabrera:**

El BQF. Cristhian Arturo Zambrano Cabrera, Mgtr. Magister en Biotecnología; Magister en Ingeniería Ambiental y Seguridad Industrial; Diploma Superior en Docencia Universitaria. Docente de las carreras de Bioquímica y Farmacia, Ingeniería Química, Ingeniería en Alimentos. Es autor de varios artículos científicos con una amplia trayectoria en la enseñanza e investigación; aportando en el avance de conocimientos y en la formación de futuros profesionales.

**Luiggi Óscar Solano Maza:**

Mgs, Magíster en Análisis Biológico y Diagnóstico de Laboratorio, Magister en Ciencias de Laboratorio clínico es Bioquímico Farmacéutico y docente en la Carrera de Bioquímica y Farmacia, con una destacada trayectoria en el campo del laboratorio clínico. Es autor de artículos científicos, libros y ha participado como ponente en eventos nacionales e internacionales, contribuyendo al avance del conocimiento en su área y formando futuros profesionales en el ámbito de la salud.

**Gabriel David Muñoz Sagbay:**

Estudiante de la carrera de Bioquímica y Farmacia, se destaca por su compromiso con la excelencia académica y su vocación científica. Ha participado activamente como colaborador en diversos proyectos de investigación y actividades académicas en el área de microbiología y biología molecular, donde ha demostrado habilidades analíticas y trabajo en equipo. Su interés por la generación y difusión del

conocimiento lo motiva a contribuir con herramientas educativas para la comunidad estudiantil.

**Johnny Patricio España Murillo:**

Cursa actualmente sus estudios en la carrera de bioquímica y farmacia. Durante su trayectoria estudiantil, ha mostrado un gran interés por la investigación, cooperando en el desarrollo de estudios y prácticas que han fortalecido su perfil técnico. Este aporte bibliográfico refleja su dedicación por profundizar en las ciencias biológicas y su deseo de aportar valor a la formación académica de su entorno.

# BIOLOGÍA: COMPOSICIÓN, FUNCIÓN Y REGULACIÓN DE LOS SERES VIVOS

**Estimado lector,** el libro "Biología: composición, función y regulación de los seres vivos", elaborado por cristhian zambrano cabrera, luiggi solano maza, gabriel muñoz sagbay y johnny españa murillo de la universidad técnica de machala (utmach), ofrece un tratado integral sobre las bases estructurales, bioquímicas, metabólicas y biotecnológicas de los organismos. a lo largo de sus capítulos, la obra examina la célula como unidad fundamental de la vida, describiendo las propiedades emergentes de los seres vivos, los postulados de la teoría celular y las diferencias estructurales entre células procariotas y eucariotas, tanto animales como vegetales, con énfasis en la compartimentalización de sus orgánulos.

Asimismo, el texto aborda la química de la vida y la dinámica de membranas, analizando la función de compuestos inorgánicos, la estructura de las macromoléculas (carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos) y los mecanismos de transporte pasivo y activo bajo el modelo de mosaico fluido. en el plano metabólico, detalla el acoplamiento termodinámico entre catabolismo y anabolismo mediante el ciclo atp-adp, desglosando las etapas de la respiración celular aeróbica, las rutas de bajo rendimiento energético como la fermentación láctica y alcohólica, y la relevancia de los ciclos biogeoquímicos.

Finalmente, la obra profundiza en el control molecular y la biotecnología aplicada, analizando la cinética enzimática de michaelis-menten y los factores moduladores de la catálisis. además, describe el desarrollo de tecnologías de purificación, inmovilización enzimática y bioproducción a escala industrial, destacando su impacto en la salud, la alimentación y la química verde sostenible.

GRUPO BLR

**Grupo Editorial BLR**
**Ecuador**
**Cel: +593 98 320 4362**
**https://grupoblr.com/**
**publicaciones@grupoblr.com**

ISBN: 978-9907-802-47-4

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA 1969