

Capítulo 5. INTRODUCCIÓN A LA BIOQUÍMICA.....	122
5.1. CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS MICROORGANISMOS	122
5.2. METABOLISMO MICROBIANO	125
5.3. FUNDAMENTOS DE BIOQUÍMICA	134
5.3.1. Características de las enzimas	135
5.3.2. Propiedades de las enzimas.	136
5.3.3. Mecanismos de la acción enzimática.....	136
5.3.4. Clases principales de enzimas	138
5.4. C O F A C T O R E S	138
5.5. TRAZAS Y ELEMENTOS MAYORES.....	139
5.6. BIOQUÍMICA DE LOS CARBOHIDRATOS	139
5.7. BIOQUÍMICA DE LAS PROTEÍNAS	141
5.8. BIOQUÍMICA DE LAS GRASAS Y ACEITES	142
5.9. SULFORREDUCCIÓN Y SULFATACIÓN	144
5.9.1. SULFORREDUCCIÓN.....	145
5.9.2. SULFATACIÓN.	147

Capítulo 5. INTRODUCCIÓN A LA BIOQUÍMICA

El campo de la ingeniería ambiental ha desarrollado los procesos de tratamiento de efluentes con una gran cobertura en procesos biológicos que utilizan microorganismos para descomponer las grandes moléculas orgánicas que conforman los seres vivos, en moléculas más pequeñas que puedan ser fácilmente retiradas del vertimiento. Estos tratamientos se basan en las reacciones químicas que los microorganismos realizan en su metabolismo y por esta razón se plantea este capítulo que introduce las bases elementales de la bioquímica, de los microorganismos y de su acción. También los microorganismos actúan en la naturaleza y manejan reacciones que pueden llegar a producir contaminaciones de aguas y fenómenos de físicos que cambian los compuestos inorgánicos para producir su energía estableciendo de paso los ciclos de cada elemento de acuerdo a su interacción natural.

5.1. CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS MICROORGANISMOS

Para entender mejor las reacciones bioquímicas es importante tener en cuenta la acción de los microorganismos y su metabolismo que hace posible las degradaciones de los compuestos orgánicos presentes en el agua. La bioquímica esta de la mano de la microbiología y su desarrollo es complementario.

CLASIFICACIÓN GENERAL ⁽¹²⁾:

Grupo	estructura celular	caracterización	miembros representativos
<i>Eucarióticos</i>	eucariótica	multicelular. gran Diferencia entre células Tejidos.	plantas y animales
		Unicelular. Sin diferenciación o muy poca de tejidos.	algas, hongos, protozoos
<i>Eubacterias</i>	procarióticos sin membrana nuclear	química celular. Parecidos a las eucarioticos.	La mayoría de las Bacterias
<i>Arqueobacterias</i>	procarioticas	química celular distinta	metanogénicas, halófilos,

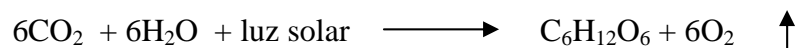
Las células de los organismos mayores están recubiertas por membranas celulares compuestas por proteínas y lípidos, protegen a la célula de materiales tóxicos. El citoplasma contiene proteínas y ácidos nucleicos principalmente, las proteínas son sintetizadas en el ribosoma celular, el núcleo de la célula es el centro de control de los procesos, contiene el ADN.

Los procesos de metabolismo energético se llevan a cabo en la mitocondria donde carbohidratos proteínas y grasas son metabolizados para obtener dióxido de carbono, agua y energía. El mejor ejemplo de respiración celular es la oxidación de la glucosa:



A diferencia de las células de los animales, las células vegetales tienen pared celular compuesta de celulosa que le da la rigidez y la fortaleza a la planta. Las células que manejan la fotosíntesis contienen cloroplastos que absorben energía de la luz para convertirla en energía química (alimento), parte de este alimento se almacena como almidón.

Las células vegetales que utilizan la luz del sol como fuente de energía y el dióxido de carbono como una fuente de Carbono, son llamadas *autotrofas* y siguen básicamente la reacción:

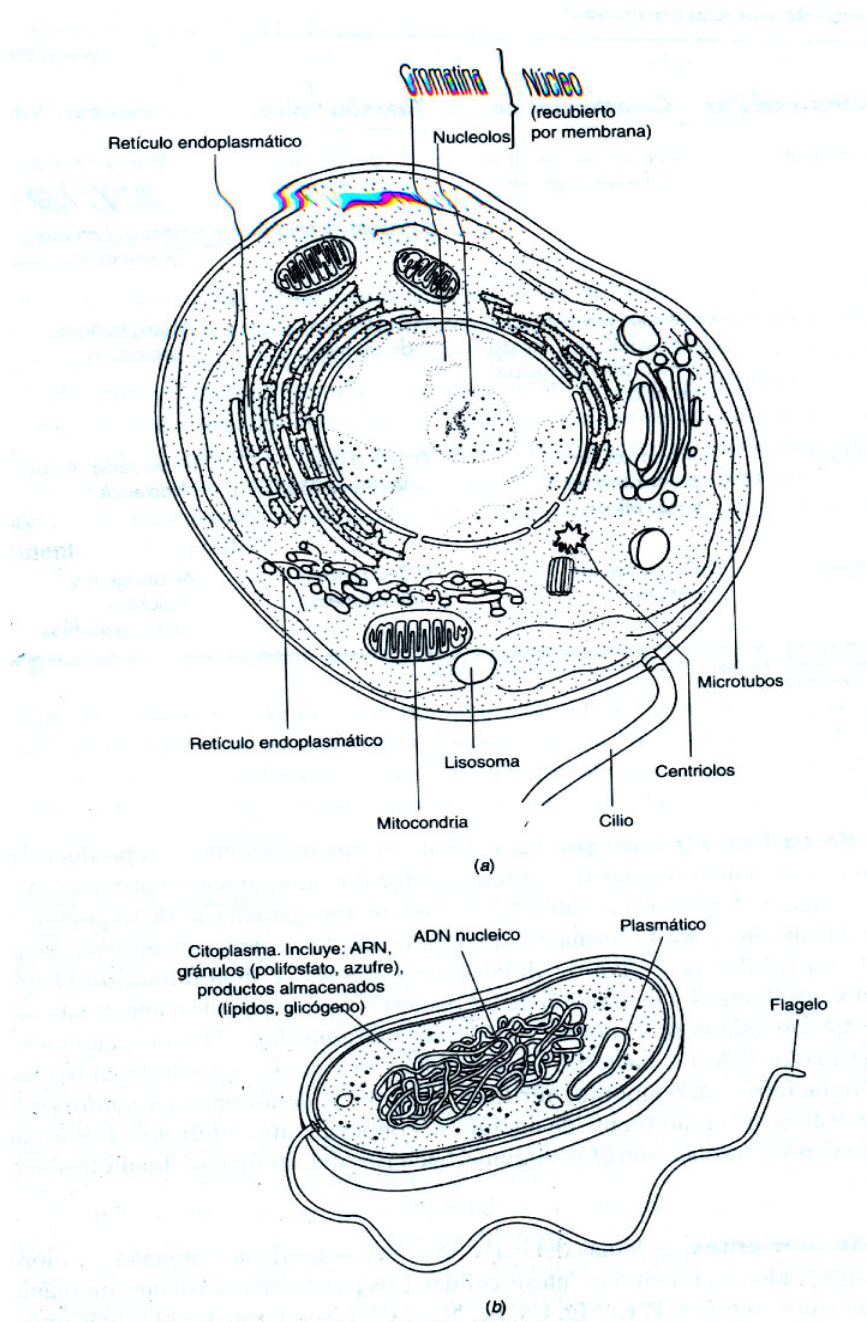


para producir azúcares con alto contenido de energía. Estos azúcares pueden convertirse en almidón insoluble en agua, celulosa para la pared celular y otros materiales y sirve como fuente de energía básica para el resto de los procesos de la planta.

Las células animales pueden depender de materiales orgánicos manufacturados por las plantas y de sus alimentos. Estas células son llamadas *heterotrofas*, ellas actúan como

medio en la reacción química entre el oxígeno y el material alimenticio utilizando la energía de la reacción para desarrollar sus procesos biológicos.

Los mayores reactivos biológicos son proteínas, carbohidratos y lípidos y el catalizador de las reacciones bioquímicas se denomina enzima.



Estructura típica de microorganismos celulares: a) eucariótico b) procariótico. ⁽¹²⁾

5.2. METABOLISMO MICROBIANO

Los microorganismos desarrollan actividades químicas en forma organizada a través de las células que comprenden la producción y utilización de energía, proceso que se conoce con el nombre de metabolismo.

La bioenergética estudia las formas de producir y consumir energía por parte de las células. Gran cantidad de células obtienen energía a través de una serie de reacciones químicas que liberan energía. Otras utilizan la luz como fuente energética pero, deben convertirla a energía química para poder utilizarla.

Para estudiar los distintos procesos metabólicos se debe partir del concepto de *energía libre* ó ΔG° o sea la cantidad de energía liberada o consumida durante el desarrollo de una reacción química; teniendo en cuenta que la energía útil es el cambio en energía libre.

Una reacción es *endergónica* cuando requiere energía y ΔG° es positiva, y una reacción es *exergónica* cuando libera energía siendo ΔG° negativa.

ΔG° se relaciona con la constante de equilibrio de la reacción, así:

$$\Delta G^\circ \text{ a } 25^\circ\text{C y } 1 \text{ atm.} = - R T \text{ Ln } K_{eq}.$$

Donde R= constante de los gases y T= temperatura absoluta

La energía puede obtenerse de una reacción química en la forma de potencial eléctrico. La energía eléctrica es generada cuando la oxidación ocurre por remoción de electrones; se produce energía cuando los electrones caen a través de una diferencia de potencial.

$$\Delta G^\circ = - n F E^\circ$$

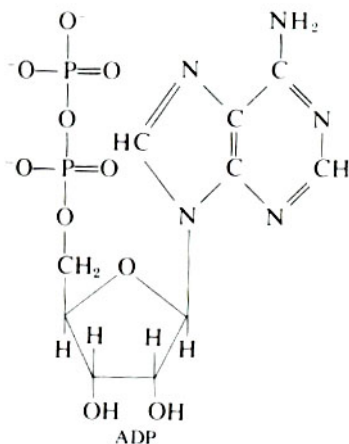
Siendo n = número de electrones transferidos, F= constante de Faraday y

E° = diferencia de potencial de oxido-reducción estándar.

Para la vida es esencial que la energía liberada de una reacción exergónica sea usada para efectuar las reacciones endergónicas. Este acoplamiento de reacciones se basa en el

principio de un *reactante común*. Los reactantes comunes son muy útiles a las células y se denominan *compuestos de transferencia de alta energía*. Entre los principales están: el ATP adenosin trifosfato; el GTP guanosintrifosfato; el UTP uridintrifosfato; el CTP o citidintrifosfato; el ácido fosfoenol pirúvico y el acetil fosfato.

Por ejemplo para el ATP⁽¹⁾:



Los procesos metabólicos comprenden la *oxidación*: o sea la remoción de electrones o de átomos de hidrogeno, con ayuda de la coenzima A, la cual es reducida y convertida en NADH; y la *Fosforilación oxidativa* o sea cuando los electrones son transferidos del NADH através de una serie de reacciones utilizando coenzimas, hasta el aceptor final de electrones.

Durante estas transferencias una parte de la energía disponible es transferida al ADP (adenosin difosfato), y otra parte se pierde como calor, debido a una transferencia ineficiente.

Parte del ATP puede formarse directamente en las transformaciones orgánicas, como en la transformación de glucosa en piruvato.

El nitrato puede utilizarse como aceptor final de electrones por organismos facultativos que viven en condiciones intermedias entre aerobias y anaerobias, llamadas anoxicas, las cuales se caracterizan por producir finalmente CO_2 , H_2O y Nitrógeno gaseoso y no producen metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico como en condiciones anaerobias.

La oxidación es la pérdida de electrones y la reducción la ganancia de los mismos, muchas reacciones de oxidación son deshidrogenaciones. La oxidación incluye la transferencia de electrones por una sustancia reducida denominada *donador de electrones* a una sustancia oxidada llamada *aceptor de electrones*.

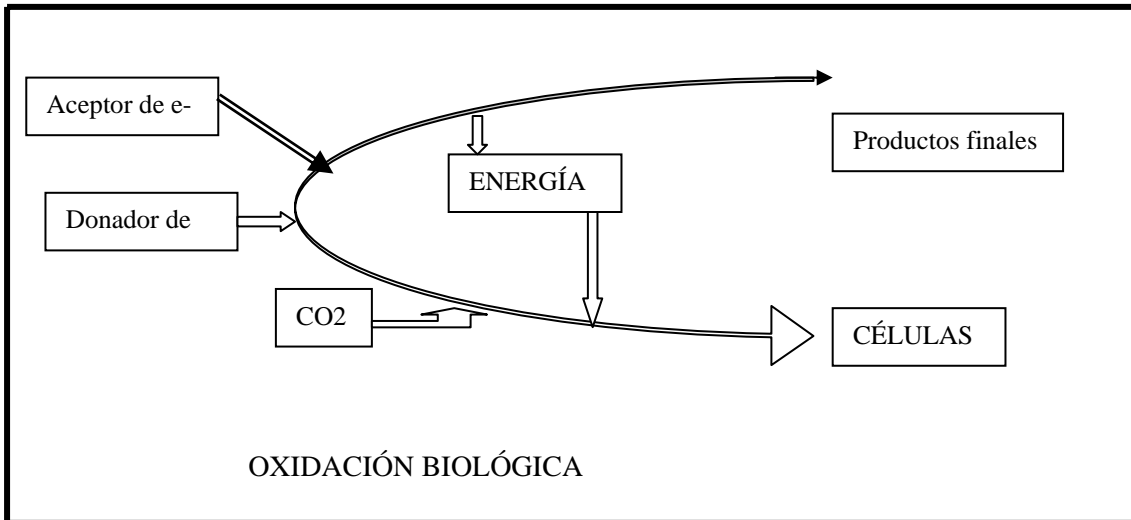
Pueden ser donadores de electrones: los alimentos, el amoníaco NH_3 , el ácido sulfhídrico H_2S , el Hidrogeno H_2 y el Hierro ionico Fe.

La materia orgánica es utilizada como alimento por las bacterias y los hongos como lo hacen los animales mayores. Sinembargo algunas bacterias utilizan materia inorgánica reducida, como fuente de energía.

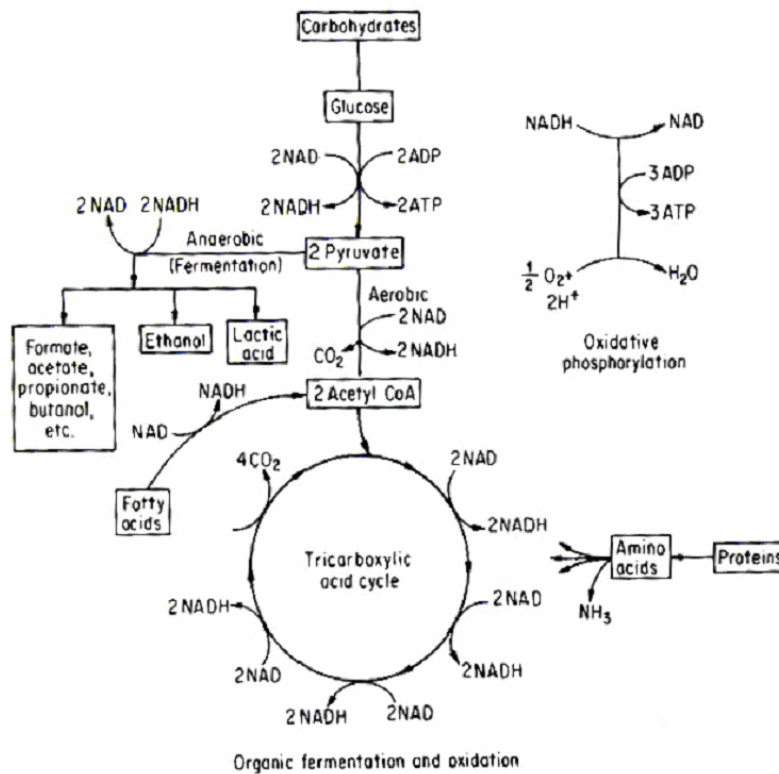
Se llaman *heterotrofas* las que necesitan oxidar materia orgánica como fuente de energía y *autotrofas* (capaces de mantenerse a sí mismas) las que oxidan materia inorgánica que toman del medio como Nitrógeno, Azufre, Fósforo, dióxido de carbono e Hidrógeno.

La energía es transferida del donador de electrones al organismo por una serie de reacciones enzimáticas, para síntesis y mantenimiento.





El ADP utiliza la energía liberada en la oxidación para formar un enlace con fosfato y formar otro nucleótido: ATP que viaja a través de la célula y entrega esa energía.



Generalized pathways for aerobic or anaerobic fermentation and oxidation of organics and transfer of energy released through NAD to form ATP.

#	Reacción media	ΔG_0 (W) Kcal/e equ.
Reacciones para síntesis celular (Rc)		
Amonio como fuente de nitrógeno		
1.	$1/5 \text{ CO}_2 + 1/20 \text{ HCO}_3^- + 1/20 \text{ NH}_4^+ + e = 1/20 \text{ C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} + 9/20 \text{ H}_2\text{O}$	
nitrato como fuente de nitrógeno		
2.	$1/28 \text{ NO}_3^- + 5/28 \text{ CO}_2 + 29/28 \text{ H}^+ + e = 1/28 \text{ C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} + 11/28 \text{ H}_2\text{O}$	
reacciones para aceptores de electrones (Ra)		
Oxígeno		
3.	$1/4 \text{ O}_2 + \text{H}^+ + e = 1/2 \text{ H}_2\text{O}$	-18.675
nitrato		
4.	$1/5 \text{ NO}_3^- + 6/5 \text{ H}^+ + e = 1/10 \text{ N}_2 + 3/5 \text{ H}_2\text{O}$	-17.128
sulfato		
5.	$1/8 \text{ SO}_4^{2-} + 19/18 \text{ H}^+ + e = 1/16 \text{ H}_2\text{S} + 1/16 \text{ HS}^- + 1/2 \text{ H}_2\text{O}$	5.085
dióxido de carbono (fermentación metanogénica)		
6.	$1/8 \text{ CO}_2 + \text{H}^+ + e = 1/8 \text{ CH}_4 + 1/4 \text{ H}_2\text{O}$	5.763
reacciones para donador de electrones (Rd)		
donadores orgánicos(reacciones heterotroficas)		
residuos domésticos		
7.	$9/50 \text{ CO}_2 + 1/50 \text{ NH}_4^+ + 1/50 \text{ HCO}_3^- + e = 1/50 \text{ C}_{10}\text{H}_{19}\text{O}_3\text{N} + 9/25 \text{ H}_2\text{O}$	7.6
proteínas (aminoácidos, proteínas, nitrógeno orgánico)		
8.	$6/33 \text{ CO}_2 + \text{H}^+ + e = 1/66 \text{ C}_{16}\text{H}_{24}\text{O}_5\text{N}_4 + 27/66 \text{ H}_2\text{O}$	7.7
carbohidratos (celulosa, almidón, azucares)		
9.	$1/4 \text{ CO}_2 + \text{H}^+ + e = 1/4 \text{ CH}_2\text{O} + 1/4 \text{ H}_2\text{O}$	10.0
lípidos (grasas y aceites)		
10.	$4/23 \text{ CO}_2 + \text{H}^+ + e = 1/46 \text{ C}_8\text{H}_{16}\text{O} + 15/46 \text{ H}_2\text{O}$	6.6
acetato		
11.	$1/8 \text{ CO}_2 + 1/8 \text{ HCO}_3^- + \text{H}^+ + e = 1/8 \text{ CH}_3\text{COO}^- + 3/8 \text{ H}_2\text{O}$	6.609
etanol		
12.	$1/6 \text{ CO}_2 + \text{H}^+ + e = 1/12 \text{ CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + 1/4 \text{ H}_2\text{O}$	7.592
piruvato		
13.	$1/5 \text{ CO}_2 + 1/10 \text{ HCO}_3^- + \text{H}^+ + e = 1/10 \text{ CH}_3\text{COCOO}^- + 2/5 \text{ H}_2\text{O}$	8.545
metanol		
14.	$1/6 \text{ CO}_2 + \text{H}^+ + e = 1/6 \text{ CH}_3\text{OH} + 1/6 \text{ H}_2\text{O}$	8.965
donadores inorgánicos (reacciones autotroficas)		
15.	$\text{Fe}^{+3} + e = \text{Fe}^{+2}$	-17.780
16.	$1/2 \text{ NO}_3^- + \text{H}^+ + e = 1/2 \text{ NO}_2^- + 1/2 \text{ H}_2\text{O}$	-9.43

17.	$1/8 \text{NO}_3^- + 5/4 \text{H}^+ + e$	$= 1/8 \text{NH}_4^+ + 3/8 \text{H}_2\text{O}$	-8.245
18.	$1/6 \text{NO}_2^- + 4/3 \text{H}^+ + e$	$= 1/6 \text{NH}_4^+ + 1/3 \text{H}_2\text{O}$	-7.852
19.	$1/6 \text{SO}_4^{-2} + 4/3 \text{H}^+ + e$	$= 1/6 \text{S} + 2/3 \text{H}_2\text{O}$	4.657
20.	$1/8 \text{SO}_4^{-2} + 19/16 \text{H}^+ + e$	$= 1/16 \text{H}_2\text{S} + 1/16 \text{HS}^- + 1/2 \text{H}_2\text{O}$	5.085
21.	$1/4 \text{SO}_4^{-2} + 5/4 \text{H}^+ + e$	$= 1/8 \text{S}_2\text{O}_3^{-2} + 5/8 \text{H}_2\text{O}$	5.091
22.	$\text{H}^+ + e$	$= 1/2 \text{H}_2$	9.670
23.	$1/2 \text{SO}_4^{-2} + \text{H}^+ + e$	$= 1/2 \text{SO}_3^{-2} + 1/2 \text{H}_2\text{O}$	10.595

tanto los reactivos como los productos tienen una actividad unitaria excepto el Hidrogeno = 10^{-7} . ()

por ejemplo se pueden plantear las diferentes reacciones que desarrolla el acetato de etilo en diferentes condiciones para conocer los niveles de energía intercambiados en cada proceso, así:

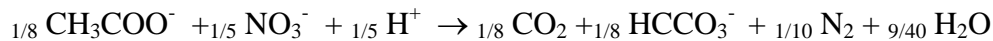
Reacciones para el acetato:

Aerobias:



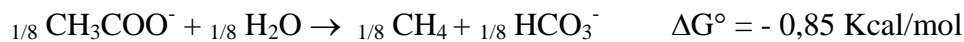
$$\Delta G^\circ = -25,28 \text{ Kcal/mol}$$

anoxicas:



$$\Delta G^\circ = -23,74 \text{ Kcal/mol.}$$

Anaerobias:



$$\Delta G^\circ = -1,52 \text{ Kcal/mol.}$$

La energía libre estándar encontrada en cada reacción para el acetato indica que se obtiene más energía en los procesos de crecimiento biológico aerobio y anóxico que en las reacciones anaerobias.

En el diseño de sistemas biológicos para tratamiento de aguas residuales el ingeniero necesita conocer todas las transformaciones que tienen lugar, por ejemplo qué parte del donador de electrones podría convertirse en energía y así, determinar la cantidad de oxígeno, nitratos o sulfatos que se necesiten o también la cantidad de metano que se

producirá. Para adicionar el nitrógeno y el fósforo se requiere conocer la cantidad de material celular o sea que se necesita realizar un balance de materia del sistema.

Las reacciones químicas balanceadas para toda la conversión biológica pueden ayudar en la realización de este balance y se puede considerar que la transformación total incluye una parte para síntesis celular, otra para el donador de electrones y otra para el aceptor de electrones, se puede calcular a partir de las reacciones pertinentes y la relación siguiente:

$$R = F_s R_c + f_e R_e - R_d \quad f_e + F_s = 1$$

Donde el subíndice s se refiere a la síntesis de material celular

El subíndice indica la energía en los cambios para el aceptor de electrones

Y el subíndice d para el donador de electrones.

R_c representa las reacciones medias para síntesis de células bacteriales y podría ser la primera o segunda reacción de la tabla anterior.

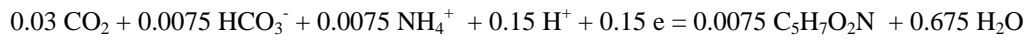
Los valores de $F_s(\max)$ pueden utilizarse a partir de la siguiente tabla presentada por Sawyer⁽¹⁾:

Donador de electrones	aceptor de electrones	$F_s(\max)$
Reacciones heterotroficas:		
Carbohidratos	O ₂	0.72
	NO ₃ ⁻	0.6
	SO ₄ ⁻²	0.3
	CO ₂	0.28
Proteínas	O ₂	0.64
	CO ₂	0.08
Acidos grasos	O ₂	0.59
	SO ₄ ⁻²	0.06
	CO ₂	0.05
Metanol	NO ₃ ⁻	0.36
	CO ₂	0.15
Reacciones autotroficas:		
S	O ₂	0.21
S ₂ O ₃ ⁻²	O ₂	0.21
	NO ₃ ⁻	0.20
NH ₄ ⁺	O ₂	0.10
H ₂	O ₂	0.24
	CO ₂	0.04
Fe ⁺²	O ₂	0.07

Como ejemplo de la utilización de las reacciones medias en los balances podemos encontrar la ecuación balanceada para la fermentación de glucosa a etanol, asumiendo que el amonio esta presente como nutrientes y que fs es igual a 0.15:

Fe = 0.85 para Rc tomamos la reacción 1; Para Rd la reacción 9 y para Re la reacción 12

Fs Rc : 0.15 R1



feRe : 0.85R9



-Rd (+inverso de R12)



reacción final:



Con base en esta reacción se pueden realizar los balances de materia y calcular los requerimientos de nutrientes que deben adicionarse al reactor para que las bacterias puedan desarrollar estas transformaciones.

5.3. FUNDAMENTOS DE BIOQUIMICA

La bioquímica trata de los cambios realizados en los organismos vivos. Las moléculas orgánicas que contienen carbono forman los componentes esenciales de todo organismo vivo. Los átomos de carbono establecen uniones fuertes con Hidrogeno, Oxígeno, Nitrógeno y otros átomos de Carbono. Estos átomos constituyen el 99% de la masa de los organismos vivos.

La composición de los microorganismos presenta cuatro clases principales de compuestos: carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos.

CARBOHIDRATOS: $C_n(H_2O)_n$. Azúcares simples. Son polihidroxialdehidos o polihidroxicetonas. Los monosacáridos forman enlaces glucosídicos para formar polisacáridos y se unen con otros elementos como el fósforo con enlaces esterfosfatados.

LIPIDOS: Insolubles en agua y solubles en compuestos no polares como cloroformo. Componen las membranas bioquímicas formando barreras semipermeables.

Lípidos complejos: ácidos grasos ligados a un alcohol (triglicérido).

Lípidos simples: esteroides.

Los fosfolípidos se ubican en las membranas biológicas.

PROTEINAS: Grandes macromoléculas que van de 6.000 a varios millones de peso molecular.

Están compuestas de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos (grupo carboxílico de un aminoácido unido a un grupo amino de otro aminoácido).

Su función más importante es la de servir de enzimas.

ACIDOS NUCLEICOS: Grandes macromoléculas compuestas de nucleótidos.

Las reacciones bioquímicas entre estas moléculas son esenciales para el metabolismo, el desarrollo y la reproducción microbiana.

Las reacciones pueden ser extracelulares o intracelulares. Las hidrolíticas son generalmente extracelulares. Ellas reducen los compuestos orgánicos complejos hasta un tamaño que permita atravesar la pared celular (membranas).

Las reacciones de oxidación ocurren dentro de la célula y producen energía de acuerdo a la energía libre de la reacción particular.

Las reacciones bioquímicas ocurren entre 0 y 60 °C de temperatura y se denominan así:

Psicrofilicas de 0 a 10° C

Mesofilicas de 10 a 40 °C

Termofilicas cuando ocurren a una temperatura mayor de 40 °C.

La célula debe ser capaz de tomar los nutrientes externos a ella, degradarlos para obtener energía y obtener los precursores necesarios para la síntesis de nuevo material celular.

Estos cambios pueden lograrse por la actividad de las *enzimas* que son sustancias que se hallan presentes en muy pequeñas cantidades al interior de la célula. Son catalizadores sensibles a la temperatura, de naturaleza orgánica, elaboradas por las células vivas y capaces de una acción interna o externa a ellas.

5.3.1. Características de las enzimas

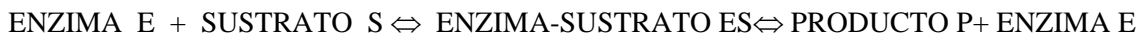
1. Aceleran la reacción.
2. No afectan el equilibrio de la reacción reversible.
3. Son específicas para determinada reacción.
4. Son compuestos orgánicos producidos por los organismos vivos.
5. Pueden actuar al interior de la célula *intracelulares-endoenzimas* o al exterior *extracelulares-exoenzimas*.
6. Están determinadas por las condiciones ambientales de la célula y por su constitución genética.

5.3.2. Propiedades de las enzimas.

Son proteínas o proteínas combinadas con otros grupos.

1. Son desnaturalizadas por el calor.
2. Se precipitan en etanol o en altas concentraciones de sales inorgánicas.
3. No son dializables.

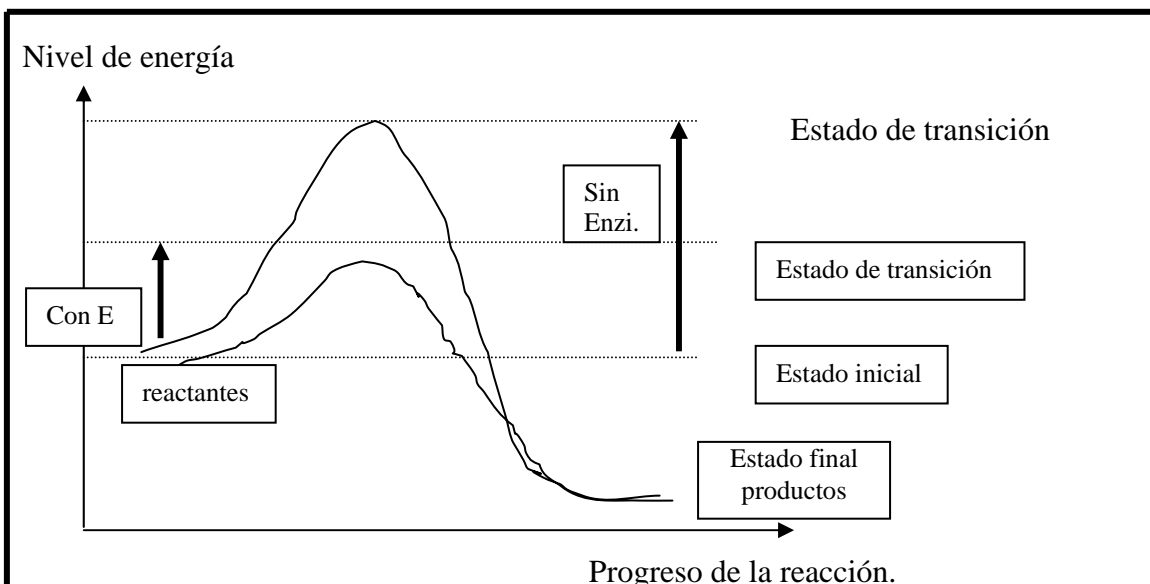
5.3.3. Mecanismos de la acción enzimática.



Este proceso se repite hasta consumir todas las moléculas de sustrato. La principal función de una enzima es disminuir la energía de activación.

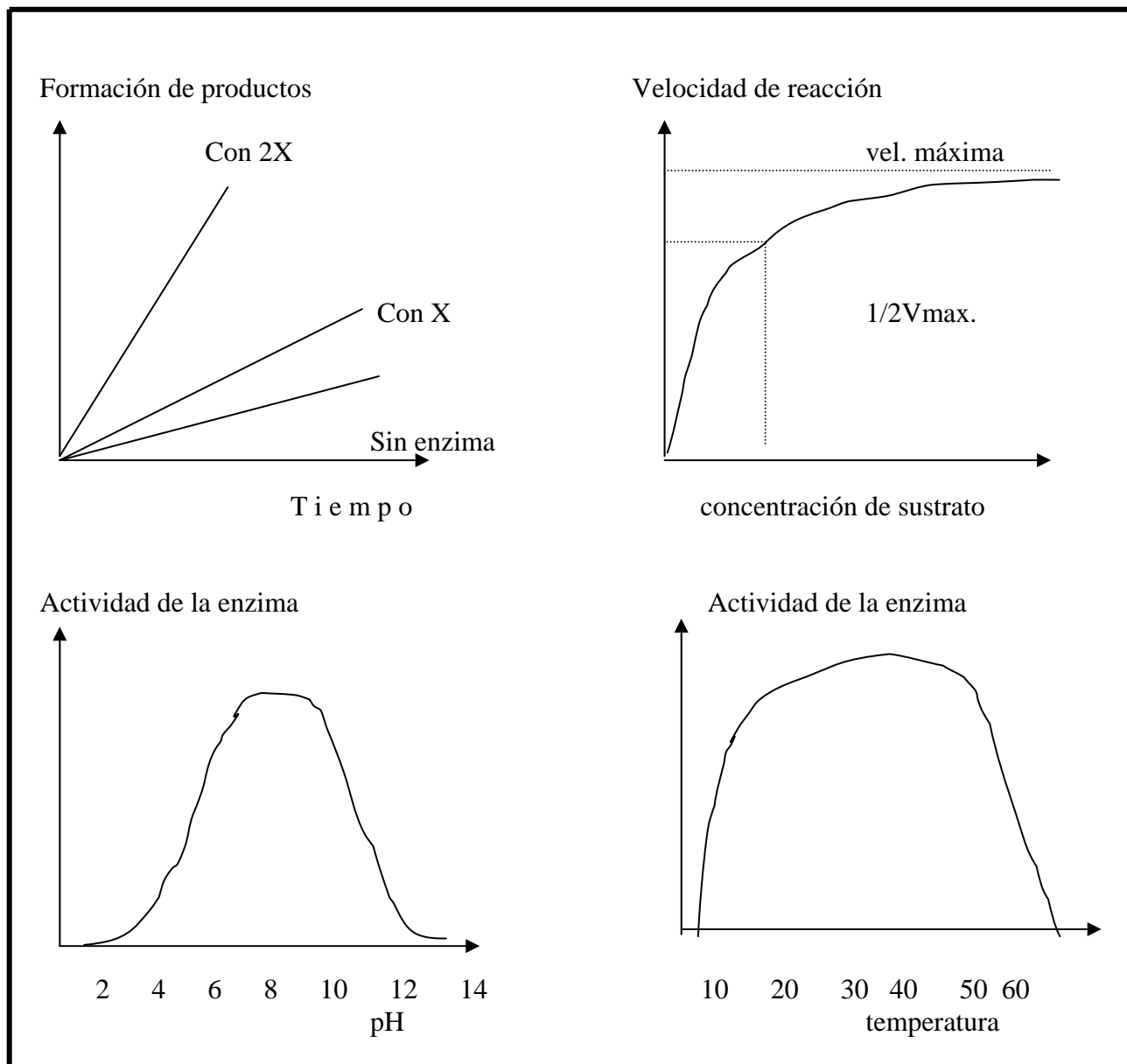
Energía de activación: cantidad de energía requerida para llevar una sustancia al estado reactivo.

La enzima se combina con el sustrato para producir un estado de transición que requiere una energía de activación menor para que la reacción se efectúe.



La actividad enzimática esta afectada por:

1. La concentración de la enzima.
2. Concentración del sustrato
3. pH
4. La temperatura.



Cada enzima tiene un rango de pH donde trabaja bien. La mayoría trabaja a pH neutro. La rata de reacción se duplica al incrementar 10°C la temperatura. La temp. Influye en el tiempo de retención, en las necesidades de oxigeno y en la solubilidad del O₂.

5.3.4. Clases principales de enzimas

1. OXIDOREDUCTASAS Reacciones de transferencia de electrones o átomos de hidrogeno.
2. TRANSFERASAS Transfieren grupos funcionales.
3. HIDROLASAS Reacciones hidrolíticas (+agua para romper enlaces)
4. LIASAS Formación de dobles enlaces y remoción de grupos químicos por reacciones no hidrolíticas.
5. ISOMERAZAS Reacciones de isomerización.
6. LIGASAS Formación de enlaces con el consumo de ATP.

5.4. COFACTORES

Algunas enzimas requieren un agente para actuar que no tiene estructura proteínica y que es llamado *cofactor*. Los cofactores pueden ser iones metálicos o complejos orgánicos llamados *coenzimas*. Algunas veces se necesitan ambos factores para la actuación de las enzimas.

Los cofactores metálicos más comunes son: Zn, Mg, Mn, Fe, Ca, P, Na. Son estables con la temperatura.

Se conocen doce coenzimas, entre ellas están:

NAD transfiere átomos de hidrogeno o electrones y participa en la oxidación de materia orgánica.

NADP tiene tres átomos de fósforo en vez de dos que tiene el NAD.

COENZIMA A trabaja en la síntesis y metabolismo de los ácidos grasos.

Una parte integral de una coenzima es una vitamina.

5.5. TRAZAS Y ELEMENTOS MAYORES

Las bacterias son los organismos vivos más simples, su tejido celular tiene una fórmula empírica aproximada a $C_5H_7NO_2$ donde el nitrógeno es cerca del 12 %. Se conocen por su capacidad de sintetizar proteínas a partir de materia orgánica. Requieren nitrógeno para su reproducción y fósforo y azufre para la formación de algunas proteínas conjugadas, por esto el nitrógeno el fósforo y el azufre se consideran nutrientes mayores.

Para el metabolismo de las bacterias se necesitan trazas de otros elementos como: calcio, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso, potasio, selenio y zinc.

Las bacterias que fijan nitrógeno requieren Molibdeno.

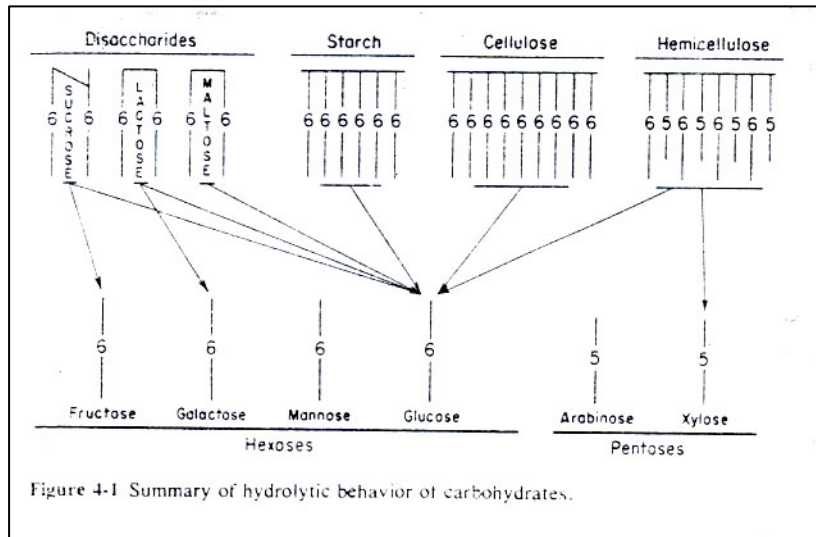
Las aguas residuales domésticas (ARD) proveen todos los elementos que necesitan las bacterias para su estabilización, lo que no ocurre con las aguas residuales industriales, a las que se debe agregar nitrógeno y fósforo para realizar tratamientos biológicos que reduzcan la materia orgánica polutante.

5.6. BIOQUIMICA DE LOS CARBOHIDRATOS

Los carbohidratos sirven como fuente de energía en animales mayores y en los microorganismos pueden ser utilizados, además, para sintetizar grasas y proteínas.

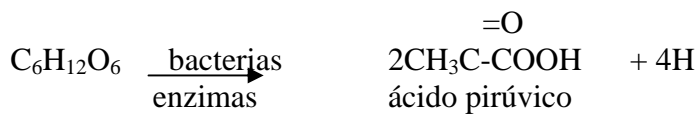
Se usan para construir el tejido celular y pueden almacenarse como polisacáridos dentro o fuera de la célula. El mecanismo es el mismo que en las plantas y los animales mayores.

La primera etapa es la *hidrólisis*, la cual se puede resumir en el siguiente cuadro:

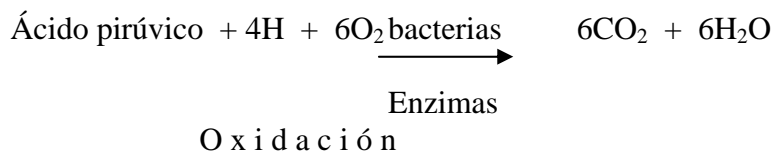


Su degradación puede progresar hasta llegar a la etapa de los Disacaridos antes de salir de la célula. En la pared, el azúcar simple puede usarse para síntesis o producción de energía.

La vía por la cual las bacterias metabolizan el azúcar en energía depende de si las condiciones son aerobias o anaerobias. En cada caso, la conversión inicial es a ácido pirúvico, así:

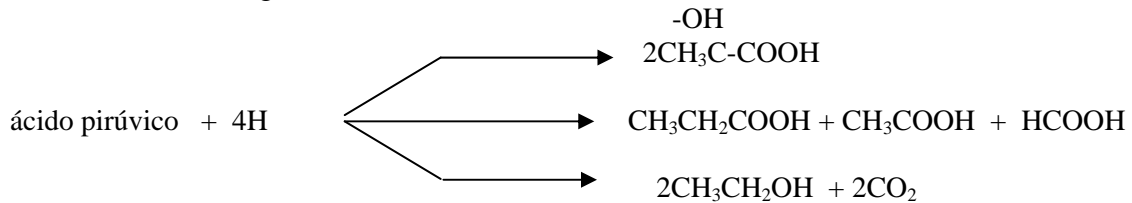


Condiciones aerobias:



En condiciones anaerobias, esta oxidación es posible y las bacterias descargan diferentes productos en la solución, de acuerdo a las bacterias y a las condiciones en que se realizan las reacciones.

Pueden ocurrir los siguientes casos:



Que la oxidación produzca ácidos, alcoholes o cetonas con la intervención de enzimas y bacterias en cada caso.

Los ácidos disminuyen el pH y pueden llegar a terminar la actividad biológica en condiciones aerobias.

5.7. BIOQUIMICA DE LAS PROTEINAS

Son esenciales en las dietas de animales mayores, se usan en la construcción del tejido celular. Si se consumen en mayor cantidad se usan para producir energía o convertirse a carbohidratos y grasas.

Las bacterias saprofiticas (spapros = muerte; phytos = planta) requieren menos proteínas, las sintetizan del nitrógeno orgánico y de materia orgánica no proteica, como carbohidratos, grasas y alcoholes. Característica importante en el tratamiento de residuos líquidos de las industrias de alimentos, que son bajos en proteínas.

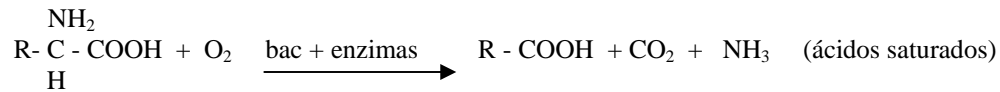
La primera etapa en la utilización biológica de las proteínas es la *hidrólisis*, que se desarrolla en etapas, así:



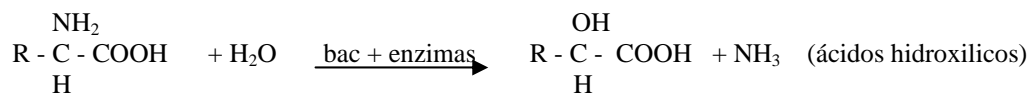
se producen α - aminoácidos antes de atravesar la pared de la célula.

Deaminación:

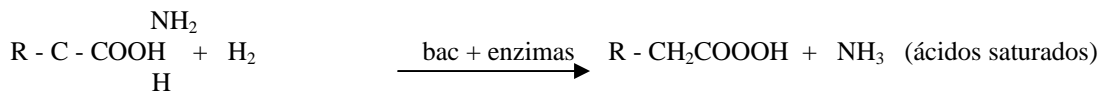
En condiciones aerobias:



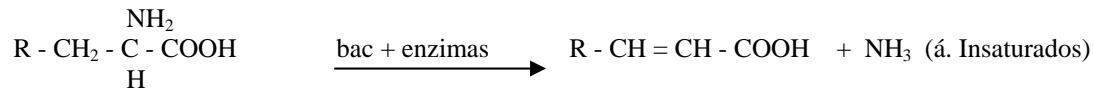
O:



En condiciones anaerobias:



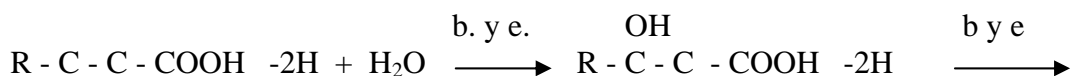
O:

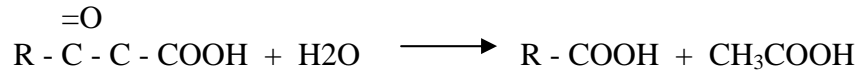


5.8. BIOQUIMICA DE LAS GRASAS Y ACEITES

La degradación o asimilación de la materia grasa es afectada por su insolubilidad, en los animales mayores la bilis secretada por el hígado las emulsiona, pero esto no lo pueden realizar las bacterias. Las grasas al tener menor densidad que el agua flotan y complican los tratamientos con lodos activados.

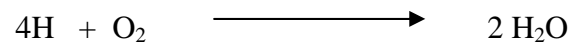
La degradación de las grasas se inicia con la hidrólisis produciendo glicerol y ácidos grasos; luego viene la oxidación, que se realiza por β -oxidación, teoría de Knoop, en etapas activadas por la coenzima A.





La ruptura de las moléculas se da en la etapa final con la formación de una molécula de ácido acético y un nuevo ácido con dos carbonos menos que sigue la β -oxidación hasta ácido acético.

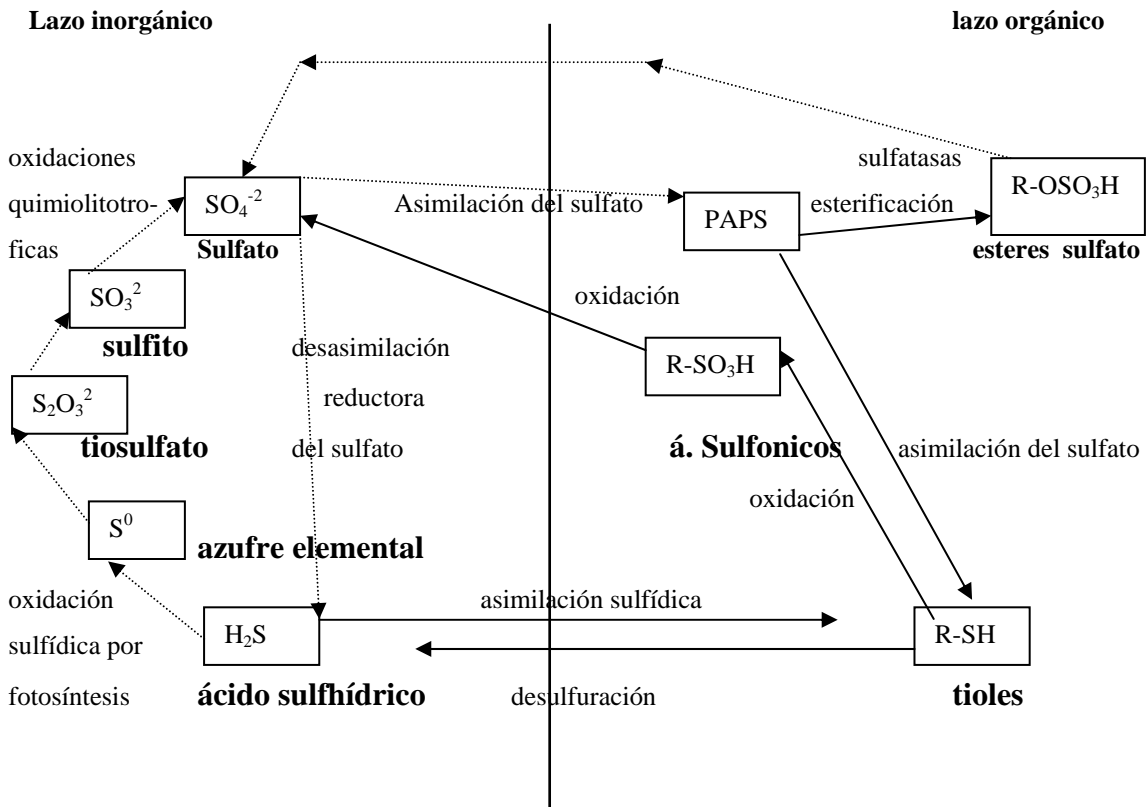
Se remueven cuatro hidrógenos por cada molécula de ácido acético producido, los cuales se oxidan para formar agua en condiciones aerobias así:



en condiciones anaerobias, esto no es posible, se sigue otro procedimiento general.

5.9. SULFORREDUCCIÓN Y SULFATACIÓN

El azufre existe en gran variedad de estados como producto de la oxidación de los compuestos orgánicos e inorgánicos y las reacciones de oxidorreducción mediadas por microorganismos, las que cambian los estados de oxidación del azufre presente en varios compuestos y establecen el ciclo del azufre.



Algunos microorganismos son capaces de remover azufre de los compuestos orgánicos:

Bajo condiciones de aerobiosis la remoción del azufre o desulfuración de los compuestos orgánicos origina formación de sulfatos. Sulfatación.

Bajo condiciones de anaerobiosis se produce normalmente ácido sulfhídrico a partir de la mineralización de los compuestos orgánicos sulfurados. Sulfo reducción.

5.9.1. SULFORREDUCCIÓN

Se puede formar ácido sulfhídrico por medio de las bacterias reductoras de sulfatos que lo utilizan como aceptor final de electrones durante la respiración anaerobia.

Las bacterias del genero *sulfobivrio* son ejemplo de este proceso que puede encontrarse en los sedimentos marinos ricos en sulfatos y se muestra también en los procesos de corrosión.

El anión sulfato es muy estable químicamente y su reducción no tiene lugar espontáneamente en la naturaleza sino bajo condiciones ambientales normales. La reducción de sulfato a sulfuro se efectúa mediante diversos estados de oxidación intermedios de los cuales el sulfito ha sido identificado con toda seguridad.

El paso inicial en la reducción del sulfato implica la activación del anión sulfato con ATP dando lugar a la formación del Adenosil fosfosulfato (APS) y esta activación es la reacción biológica fundamental para la sulforreducción. Una vez activado se efectúa fácilmente la reducción a sulfito mediante el NAD reducido. El sulfito por sí mismo es mucho mas fácilmente reducido que el sulfato, llevándose a cabo esta reacción químicamente o por diversas bacterias. Otros estados de oxidación intermedia del azufre, el tiosulfato y el tetracionato, pueden ser intermediarios en la reducción desasimiladora del sulfato, aunque se ignoran los detalles.

Otro caso de sulforreducción lo presentan las bacterias del género *cromatium* cuando se colocan en la oscuridad, el azufre elemental almacenado dentro de sus células les puede servir como un aceptor de electrones siendo reducido a sulfuro. Los electrones provienen de un producto de almacenamiento, el glucógeno. Las bacterias almacenan tanto su aceptor de electrones, azufre elemental, como su donador de electrones, el glucógeno, en forma de polímeros intracelulares.

Una reacción efectuada por muchas bacterias reductoras es la reducción del sulfato con el lactato como donador de electrones, donde dos moles de carbono orgánico son necesarias para reducir un mol de sulfato a sulfuro.

Esta situación es impactante en sedimentos marinos donde la cantidad de reducción del sulfato puede ser aumentada notablemente por la adición de materia orgánica, dando lugar a un aspecto importante en contaminación marina porque todos los desechos de aguas negras, lodos de drenaje y basura que llegan al océano aumentan la materia orgánica en los sedimentos generando una excesiva formación de ácido sulfhídrico que es potencialmente tóxico para muchos microorganismos.

Un factor importante en la determinación del destino y la incidencia del HS- ambiental, es la disponibilidad de hierro y metales pesados en el medio, ya que la mayoría de los metales forman sulfuros altamente insolubles, de forma espontánea. El hierro es común en todos los sedimentos y por tanto la reducción del sulfato casi siempre dará lugar a la formación del sulfuro de hierro, de color negro característico de las aguas donde se han efectuado procedimientos anaerobios. Si están presentes metales pesados, por ejemplo cobre o mercurio, también son precipitados como sulfuros y sólo cuando se han agotado estas fuentes se iniciara la formación de H₂S libre.

Como consecuencia de la reducción bacteriana del sulfato se han formado cierta cantidad de depósitos de minerales económicamente importantes. Los depósitos de sulfuro mineral biogénicos se encuentran característicamente en capas delgadas estratiformes en asociación con otras rocas sedimentarias por ejemplo pizarra. Deben diferenciarse los depósitos de sulfuro mineral de origen volcánico de los de origen hidrotermal que no son estratificados y que están asociados con la actividad volcánica en el área inmediata. Depósitos de mineral de sulfuro estratiforme físicamente biogénicos son aquellos del monte Isa en Australia y del norte de Rodhesia en Africa.

También presentan reducción de azufre la *escherichia coli* por reducción asimilatoria del sulfato hasta azufre elemental y la *proteus* que reduce el azufre orgánico a sulfuro en procesos de putrefacción y desulfuración.

Todas las bacterias sulforreductoras son anaerobias obligadas.

5.9.2. SULFATACIÓN.

La sulfatación o la oxidación hasta sulfatos de especies reducidas de azufre como el H₂S, S, Tiosulfato, se realiza de acuerdo con la cantidad de Oxígeno y su relación con el azufre, de la concentración de sulfuros y la presencia de metales como catalizadores pudiendo detenerse en compuestos intermedios.

Este proceso es importante en la generación de ATP de los microorganismos autotrofos, una parte de los cuales, los quimiautotrofos o quimiolitotrofos, usan la energía derivada de la oxidación de compuestos inorgánicos como el azufre para suministrar la energía necesaria en la síntesis del ATP.

Se han cultivado solo cuatro géneros consistentemente *thiobacilus*, *thiomicrospira*, *thermothrix* y *sulfolobus* asociados los dos últimos a manantiales hidrotermales y reservorios geotérmicos.

Pueden distinguirse dos amplias clases ecológicas de bacterias oxidantes de azufre, las que viven en pH neutro y las que viven en pH ácido. Muchas de las formas que viven en pH ácido tienen la capacidad de crecer en forma litotrofica empleando hierro ferroso como donador de electrones.

Thiobacilus. Este género contienen los bacilos gramnegativos con flagelo polar, que son capaces de derivar su energía de la oxidación del azufre elemental, sulfuros y tiosulfato.

La oxidación de sulfuro y azufre requiere primero la reacción de éstas sustancias con los grupos sulfhidrilos de la célula como glutación con la formación de un complejo sulfuro-sulfhidrilo. El azufre luego se oxida a sulfito por la enzima sulfuro-oxidasa.

Existen dos formas en las que se pueden oxidar el sulfuro para producir enlaces de fosfato de alta energía. En la primera se oxida a sulfato por un sulfito oxidasa ligada al citocromo, con la formación de ATP mediante la fosforilación por transporte de electrones. Este ciclo se presenta universalmente en los tiobacilos. En la segunda el sulfito reacciona con AMP,

dos electrones se eliminan y se forma el adenosin fosfosulfato APS. Los electrones eliminados se transfieren al oxígeno por medio del sistema citocromo, originando enlaces fosfato de alta energía mediante la fosforilación a nivel de sustrato, el APS reacciona con fósforo y se convierte en ADP y sulfato.

El tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$) que puede verse como un sulfuro o un sulfito se desdobra en sulfuro y sulfito. El sulfito se oxida a sulfato con la producción de ATP y el otro átomo de azufre se convierte en azufre elemental insoluble.

Otro género de organismos oxidantes de azufre es el *sulfolobus*. Los miembros de éste género no son solo acidofílicos, sino también termofílicos. Crecen sobre el nivel de pH de 1 a 5 (óptimo de 2 a 3), y a un límite de temperatura de 60 a 85°C (óptimo de 70 a 80°C).

Sulfolobus tiene una forma generalmente esférica y produce distintos lóbulos. Las células se adhieren con fuerza a los cristales de azufre donde pueden visualizarse con microscopía empleando tinciones fluorescentes. La membrana de los *sulfolobus* no es de dos etapas de fosfolípidos, sino una capa que consiste en una cadena de hidrocarbones larga, realmente un isoprenoide, conectado a ambos extremos por enlace de ester, a residuos de glicerol.

El género *thiomicrospira* consta de dos especies, ambas son litótrofos obligados, una de ellas puede crecer en forma anaeróbica con el nitrato como aceptor de electrones.

Los *Thermotrix* son bacterias pequeñas en forma de espiral, filamentosas que habitan en manantiales azufrosos calientes, con pH neutro o ligeramente ácido. Los cultivos de *thermotrix* crecen en forma aeróbica y anaeróbica, con nitrato como aceptor de electrones, a temperaturas entre 55 y 85°C.

Aunque el ácido sulfhídrico es tóxico para muchos microorganismos, las bacterias fotosintéticas sulfúricas lo utilizan como donador de electrones para generar coenzimas reducidas durante su metabolismo. Algunas depositan azufre elemental y otras sulfatos como producto de la oxidación.

El drenaje en las minas es consecuencia del metabolismo de bacterias oxidantes del azufre y del hierro. El carbón en los depósitos geológicos, muchas veces se encuentra asociado con piritas y cuando las actividades mineras de extracción exponen el mineral con pirita al oxígeno atmosférico la combinación de la autooxidación con azufre microbiano y con la oxidación del hierro produce grandes cantidades de ácido sulfúrico como parte de la recuperación de las acciones minerales. El ácido que drena de las minas destruye la vida acuática y hace que el agua ya no sea adecuada como fuente para beber o para uso recreativo.