

**ZANICHELLI**

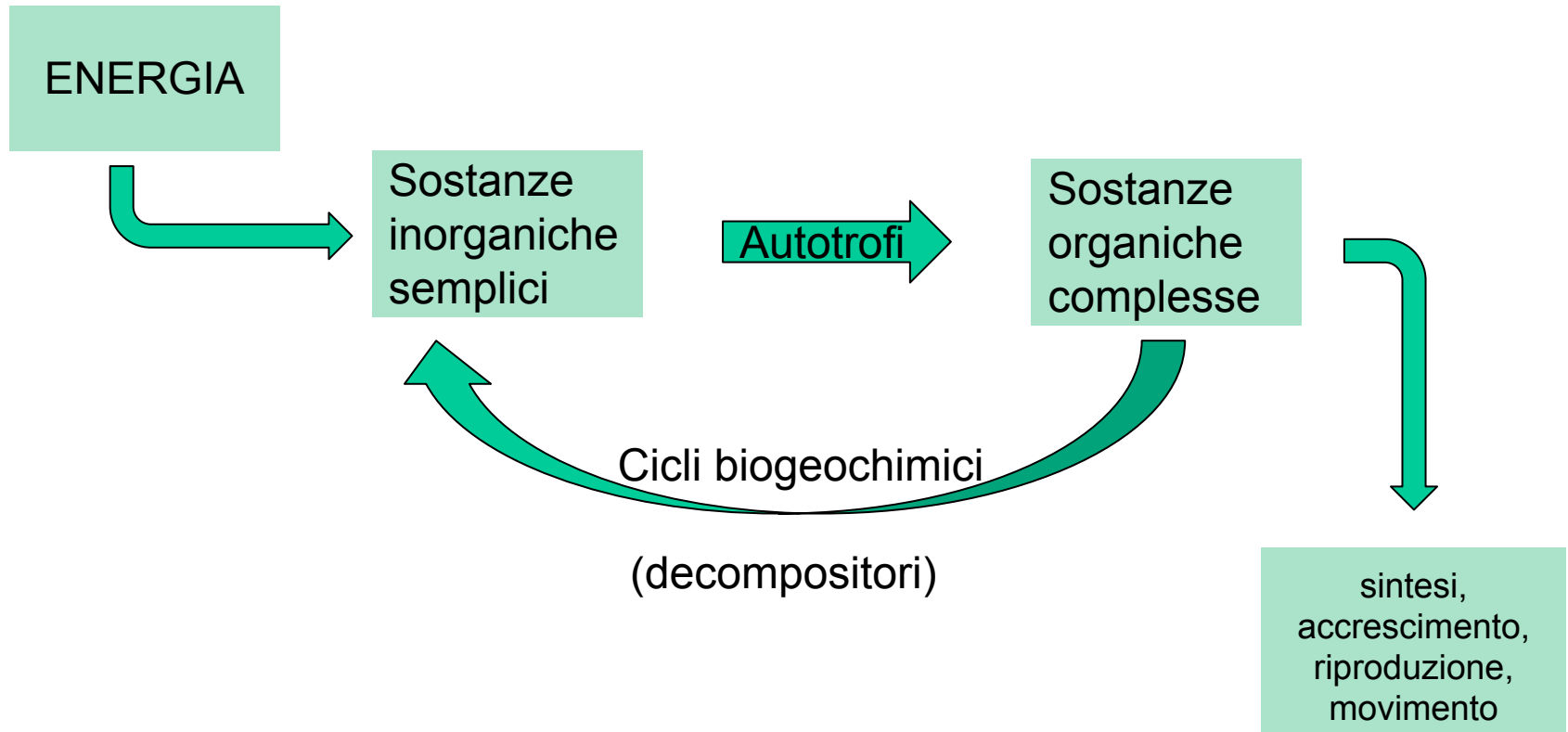
Fabio Fanti

**Biologia,  
microbiologia  
e tecniche di  
controllo sanitario**

## Capitolo 3

# Il metabolismo microbico

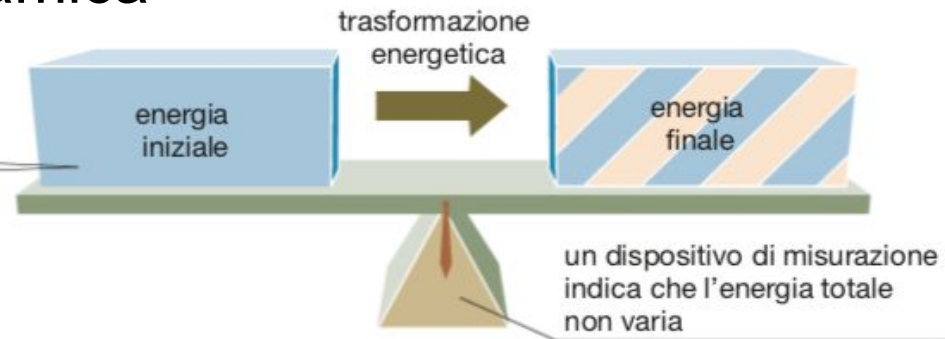
# 1. Gli scambi di energia e materia fra organismi e ambiente



## 2. La termodinamica e le trasformazioni energetiche

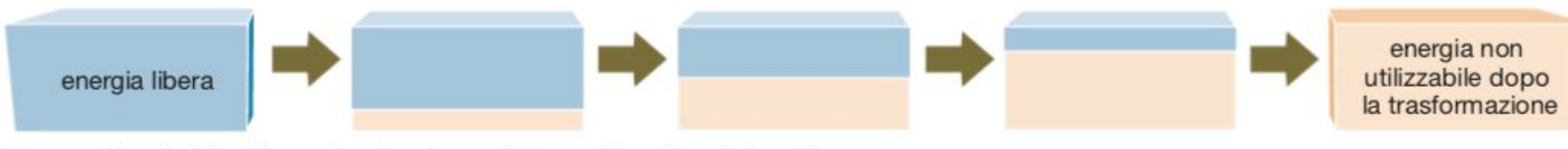
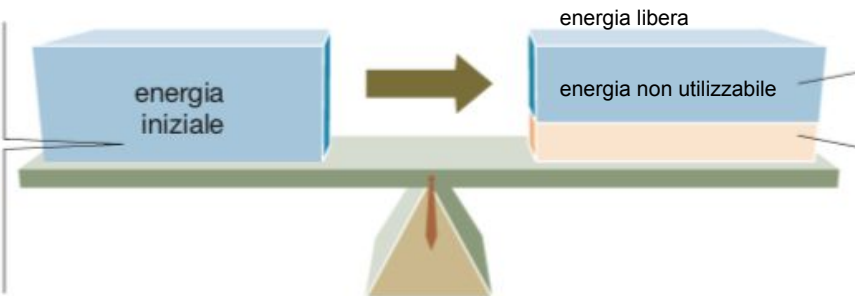
### Primo principio della termodinamica

L'energia non può essere creata, nè distrutta, ma solo trasformata



### Secondo principio della termodinamica

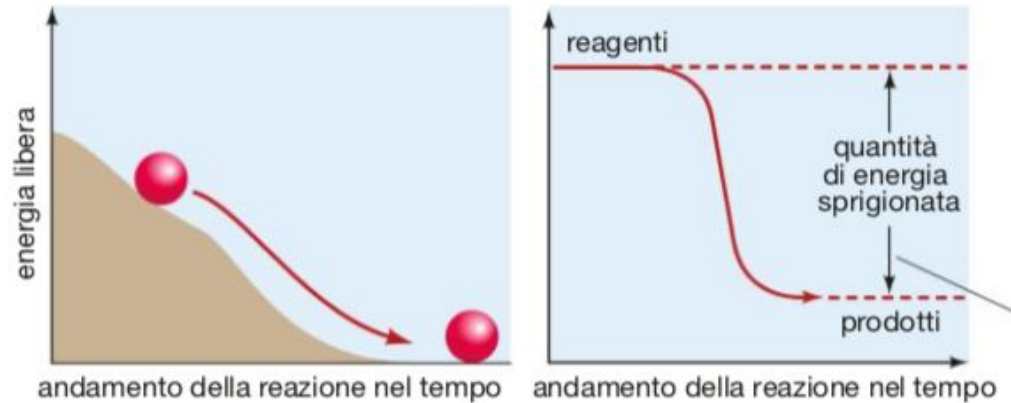
Nelle trasformazioni spontanee il disordine del sistema (*entropia*) aumenta



# 2. La termodinamica e le trasformazioni energetiche

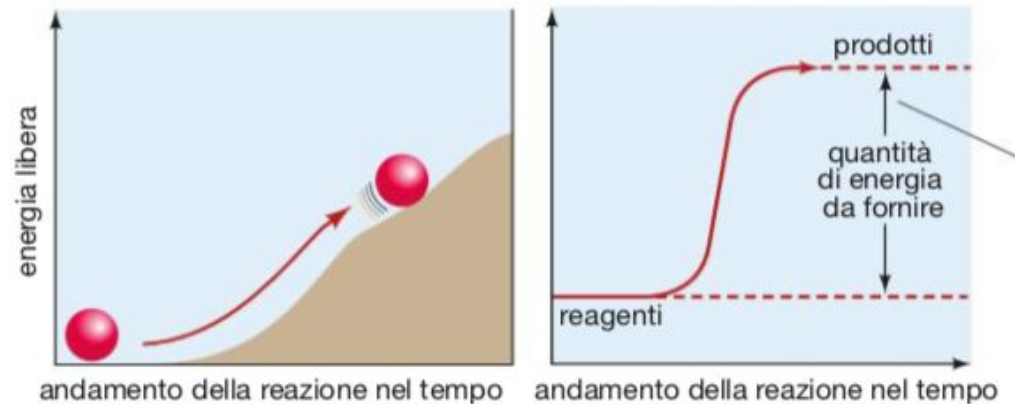
## Reazioni ESOERGONICHE

L'energia dei prodotti è inferiore a quella dei reagenti



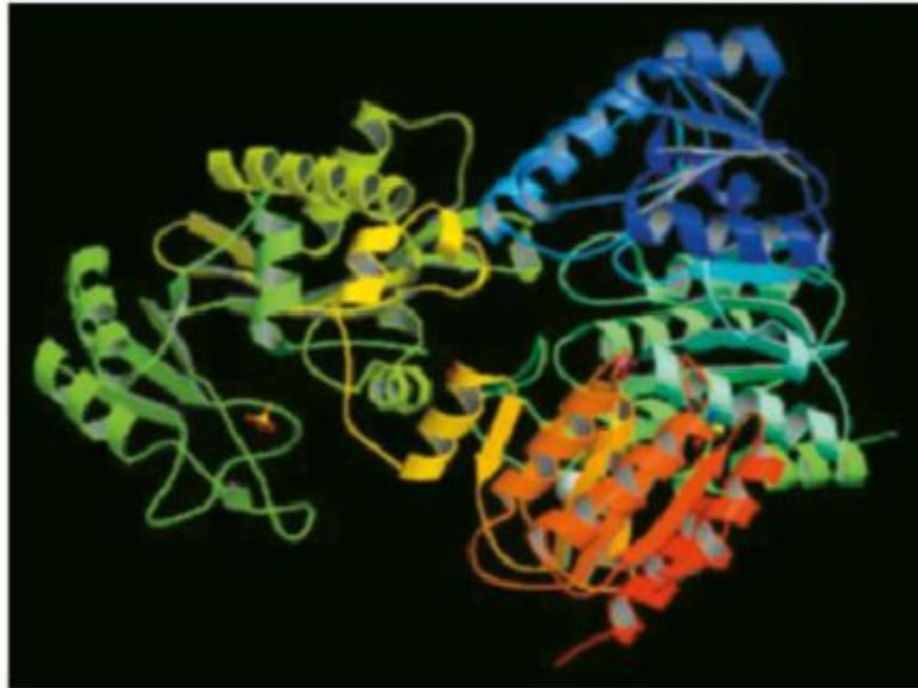
## Reazioni ENDOERGONICHE

L'energia dei prodotti è superiore a quella dei reagenti



### 3. Gli enzimi: catalizzatori biologici

Gli enzimi sono **proteine** globulari formate da una o più catene.



Struttura tridimensionale di un enzima di Escherichia coli.

Permettono di trasformare un **substrato** in un **prodotto** attraverso la formazione di un **complesso enzima-substrato (ES)**.

## 4. Caratteristiche e proprietà degli enzimi

- Restano inalterati dopo la reazione
- Sono efficaci a piccole concentrazioni
- Aumentano la velocità della reazione
- Sono substrato-specifici (modello chiave-serratura o adattamento indotto)
- Hanno un sito attivo in cui si inserisce il substrato e dove avviene la catalisi
- Possono avere bisogno di **cofattori (attivatori o coenzimi)**



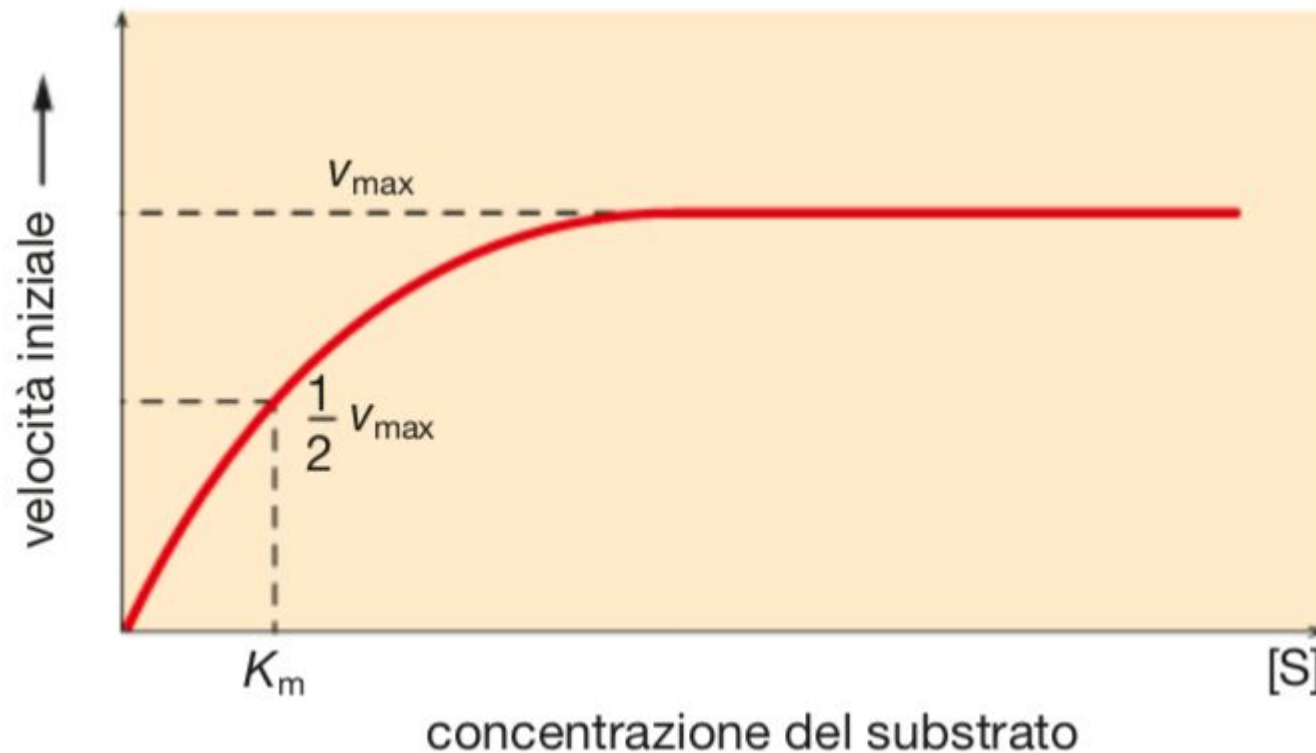


# 5. I fattori che influenzano la catalisi enzimatica

- Concentrazione del substrato
- Concentrazione dell'enzima
- Presenza di cofattori
- Effetto della temperatura
- Effetto del pH
- Effetto di inibitori

# 5. I fattori che influenzano la catalisi enzimatica

- Concentrazione del substrato

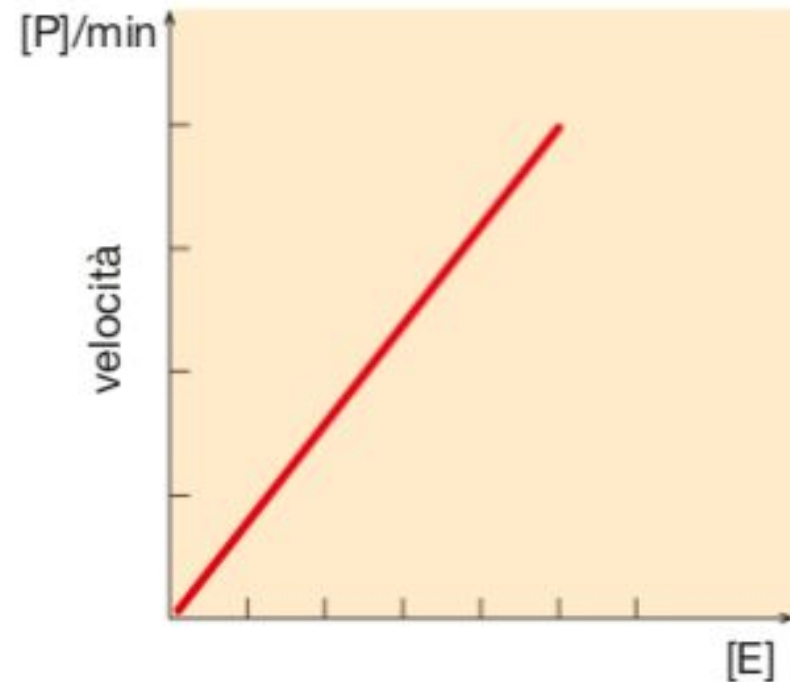
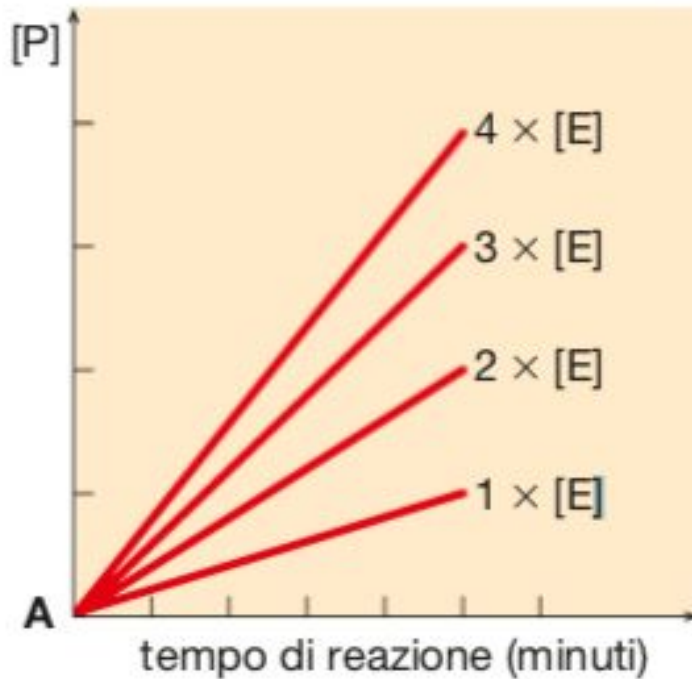


$$K_m = [S] \text{ quando } v = \frac{1}{2} v_{max}$$

esprime l'affinità dell'enzima verso il substrato

# 5. I fattori che influenzano la catalisi enzimatica

- Concentrazione dell'enzima

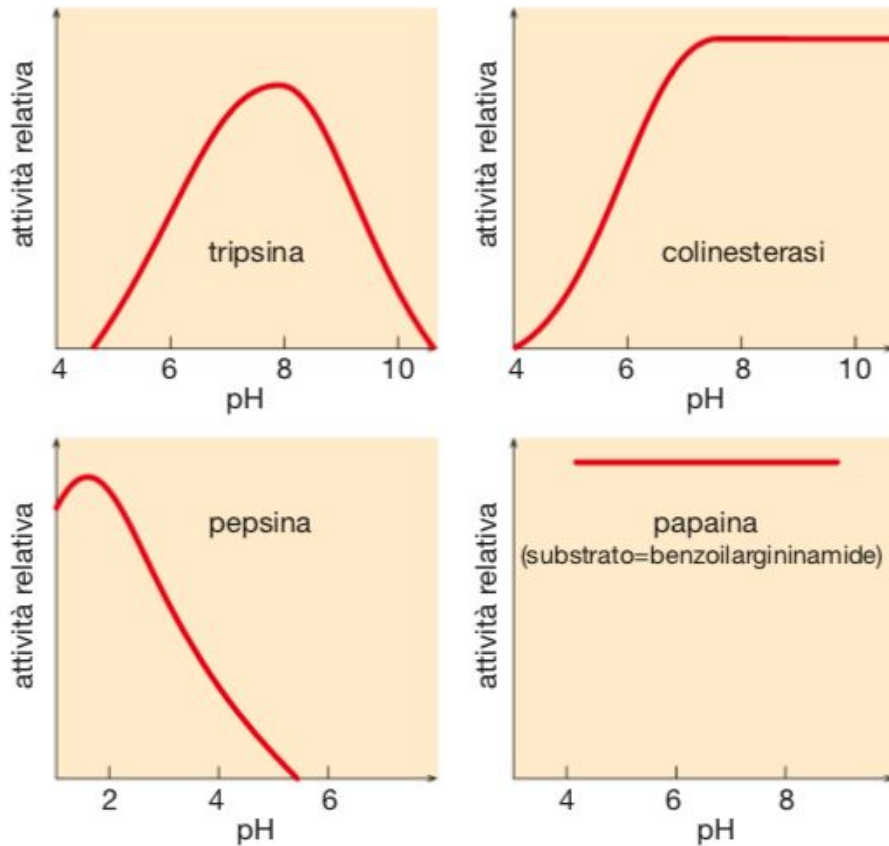


# 5. I fattori che influenzano la catalisi enzimatica

- Presenza di cofattori
  - gli **attivatori** possono far parte del sito attivo o fungere da ponte tra enzima e substrato.
  - i **coenzimi** fungono generalmente da trasportatori di atomi o gruppi chimici.
- Effetto della temperatura
  - la temperatura è direttamente proporzionale alla velocità di reazione,
  - $T > 60^{\circ}\text{C}$  provocano la denaturazione delle proteine

# 5. I fattori che influenzano la catalisi enzimatica

- Effetto del pH



Enzima	pH ottimale	Range efficienza
Amilasi salivare	6,7	6,6 ÷ 6,8
Amilasi pancreatica	7,1	7,0 ÷ 7,2
Pepsina	1,5	1,0 ÷ 2,0
Tripsina	7,9	7,8 ÷ 8,0
Chimotripsina	8,0	7,8 ÷ 8,1
Lipasi	8,0	7,8 ÷ 8,1
Saccarasi	6,0	5,0 ÷ 7,0
Maltasi	6,0	5,8 ÷ 6,2
Lattasi	5,8	5,4 ÷ 6,0
Fosfatasi	8,6	8,2 ÷ 8,8
Colinesterasi		
Papaina		

## 6. La regolazione dell'attività enzimatica

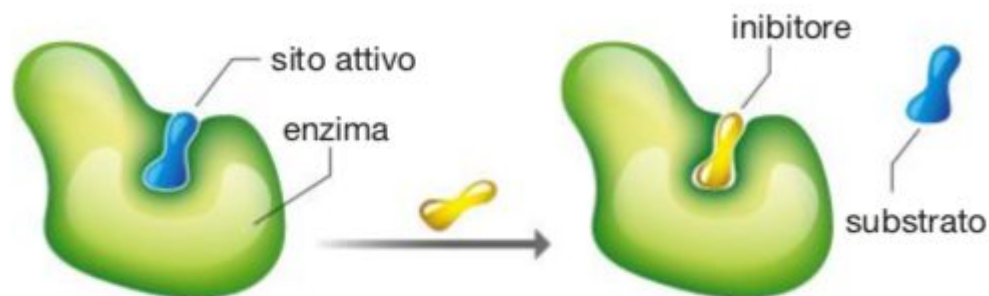
Gli enzimi **inducibili** sono prodotti solo quando e se necessario, gli enzimi **costitutivi** sono prodotti sempre.

Alcune sostanze sono in grado di inibire l'azione degli enzimi.

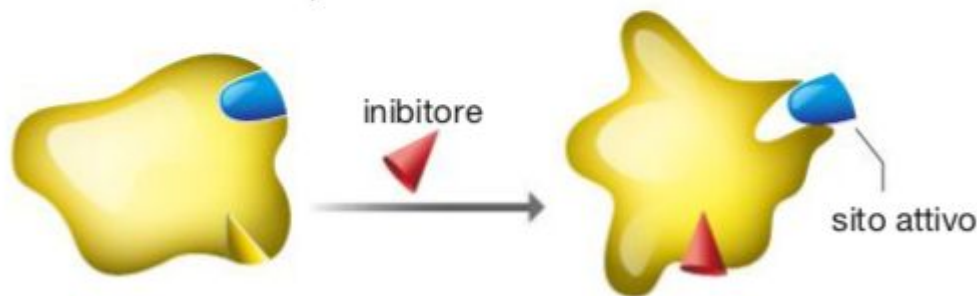
- In relazione alla stabilità di legame, si distinguono inibizioni di tipo:
  - **irreversibile**: l'inibitore si lega permanentemente al sito attivo (Es. gas nervini)
  - **reversibile**: l'inibitore non si lega in modo definitivo, e non necessariamente in corrispondenza del sito attivo.

## 6. La regolazione dell'attività enzimatica

- A livello del sito di legame, si distinguono inibizioni di tipo:
  - **competitiva**, in cui la struttura del substrato è simile a quella dell'inibitore, che lo sostituisce nel sito attivo.

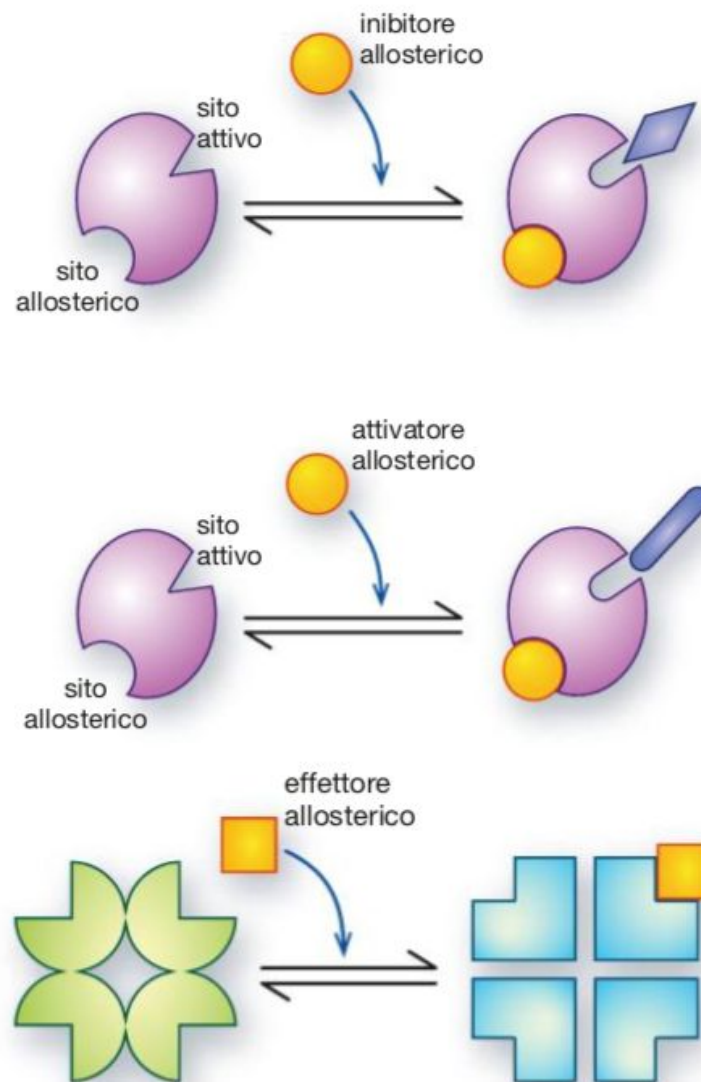
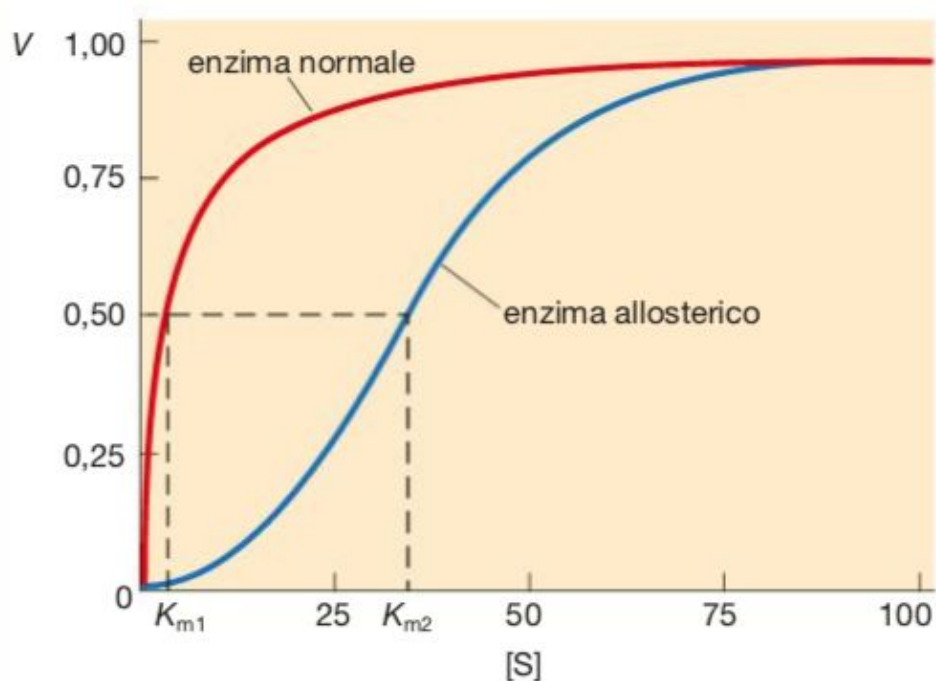


- **non competitiva**, in cui il sito cui si lega l'inibitore non coincide necessariamente con il sito attivo.



# 6. La regolazione dell'attività enzimatica

**Enzimi allosterici:** enzimi con un sito allosterico la cui attivazione può dare il via a una riorganizzazione sterica degli altri siti, attivandola o inibendola.





# 6. La regolazione dell'attività enzimatica

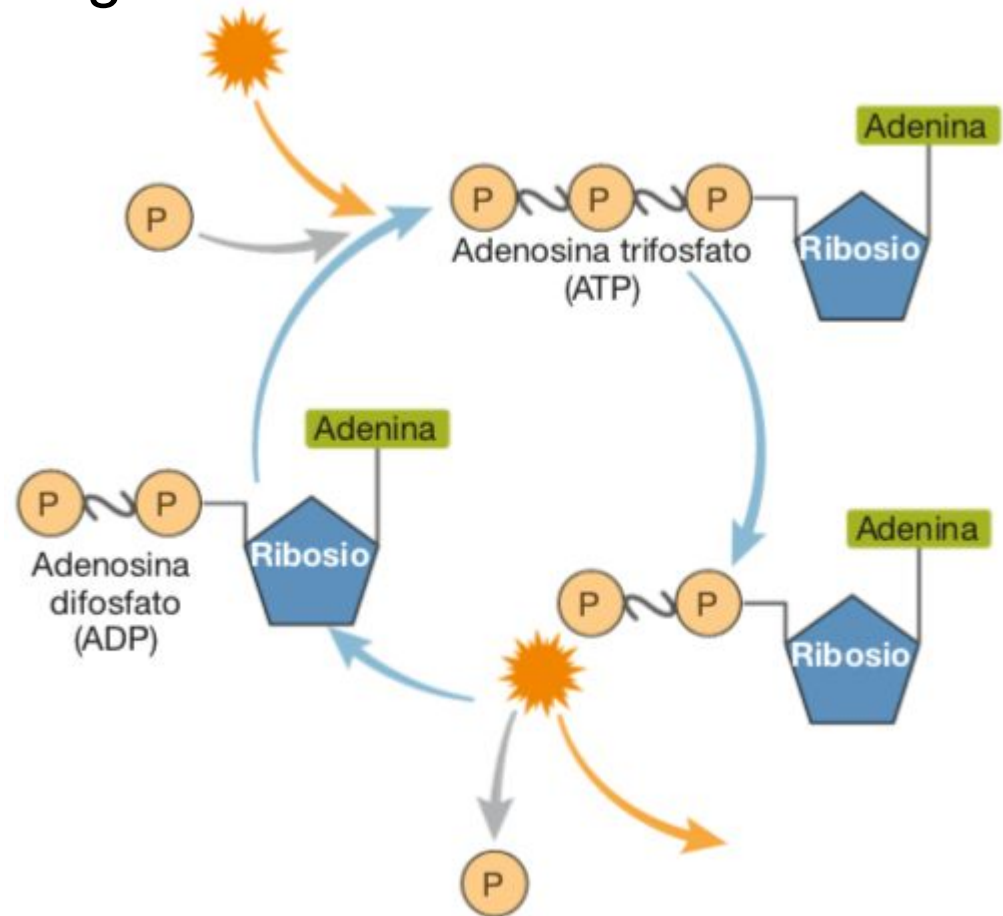
## Classificazione degli enzimi

1. **Ossidoreduttasi:** ossidoriduzioni
2. **Transferasi:** trasferimento di gruppi chimici funzionali
3. **Idrolasi:** reazioni di idrolisi
4. **Liasi:** rimozione di gruppi chimici (senza idrolisi)
5. **Isomerasi:** trasformazione in un isomero
6. **Ligasi:** unione di due molecole con consumo di ATP

# 7. Metabolismo, ATP ed energia per la cellula

**Metabolismo:** insieme di reazioni che consentono di immagazzinare o liberare energia

- **Catabolismo:**  
degradazione di  
composti organici  
(ESOERGONICHE)
- **Anabolismo:**  
costruzione di  
composti organici  
(ENDOERGONICHE)



# 7. Metabolismo, ATP ed energia per la cellula

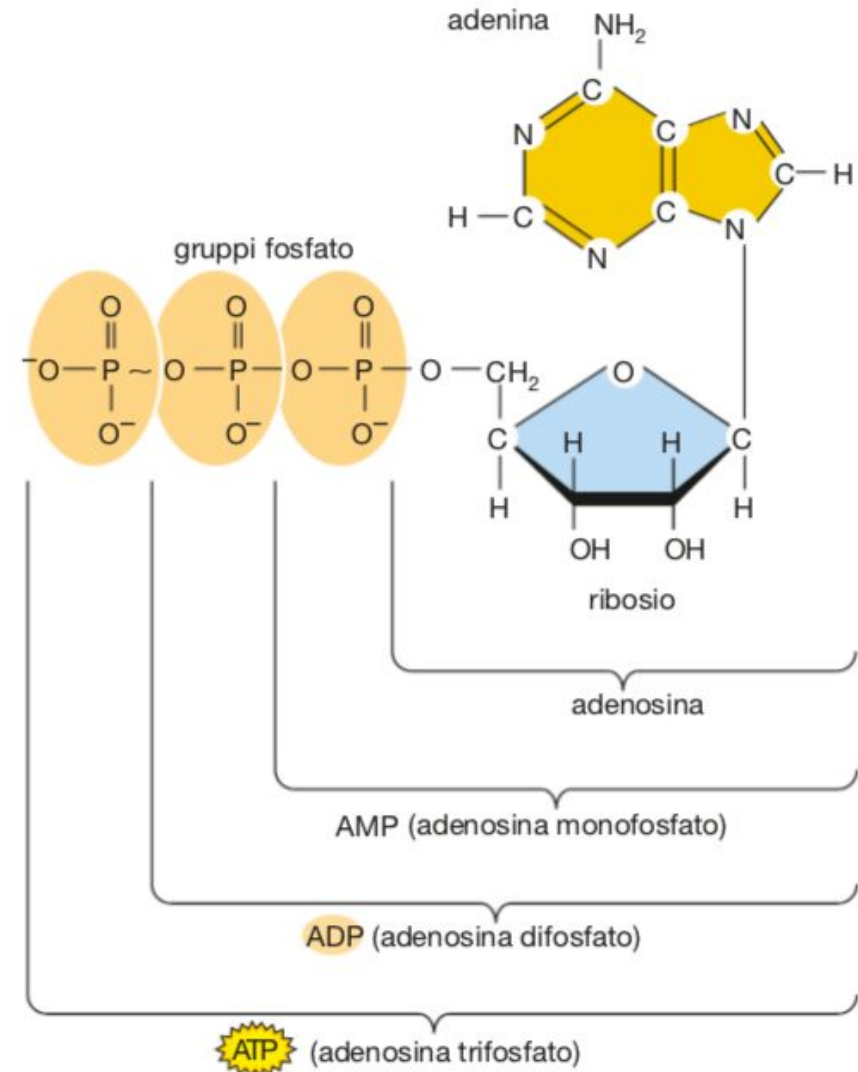
## ATP (adenosina trifosfato)

- la sua idrolisi rende disponibile molta energia
- può trasferire un gruppo fosfato ad altre molecole (**fosforilazione**)

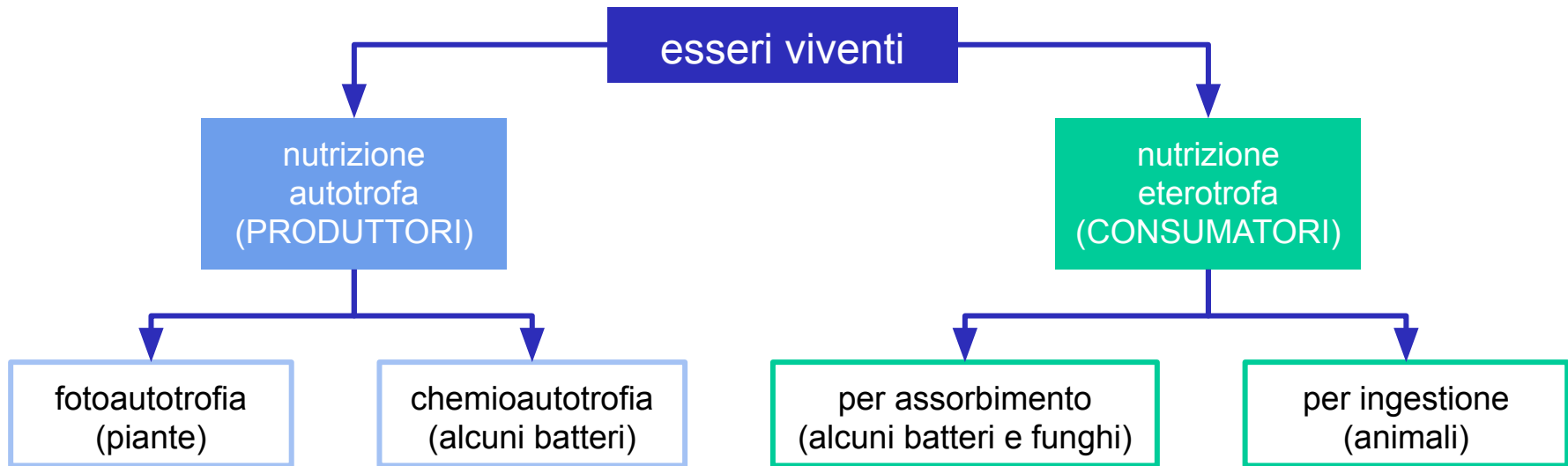


altre molecole energetiche:

- **GTP**: sintesi proteica e di RNA
- **UTP**: sintesi di RNA e metabolismo del galattosio
- **PK** (fosfocreatina): riserva di gruppi fosfato per rigenerare ATP



# 8. Le strategie nutritive dei viventi, autotrofi ed eterotrofi



Classi nutrizionali o metaboliche dei microrganismi

Tipo nutrizionale	Energia	Fonte di Idrogeno/Elettroni	Carbonio	Microrganismi rappresentativi
Fotolitotrofi autotrofi	Luce	Sostanze inorganiche	CO <sub>2</sub>	Alghe, cianobatteri, solfobatteri rossi e verdi
Fotoorganotrofi eterotrofi	Luce	Sostanze organiche	Sostanze organiche [anche CO <sub>2</sub> ]	Batteri rossi e verdi (non solfo)
Chemiolitotrofi autotrofi	Chimica (sostanze inorganiche)	Sostanze inorganiche	CO <sub>2</sub>	Batteri solfo-ossidanti, idrogenobatteri, batteri nitrificanti, ferrobatteri
Chemoorganotrofi eterotrofi	Chimica (sostanze organiche)	Sostanze organiche	Sostanze organiche	La maggior parte dei batteri non fotosintetici, protozoi, funghi

# 9. Vie anaboliche: la fototrofia

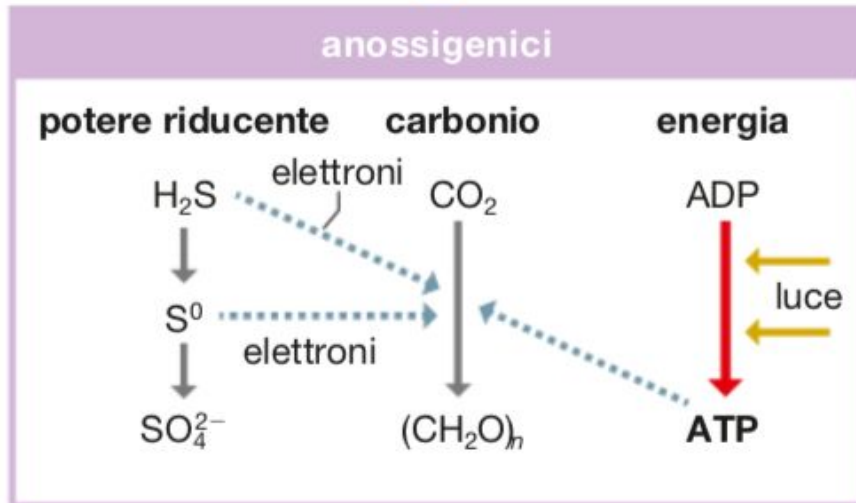
**Fototrofia** luce solare per produrre ATP e fissare CO<sub>2</sub>.

## Strutture coinvolte

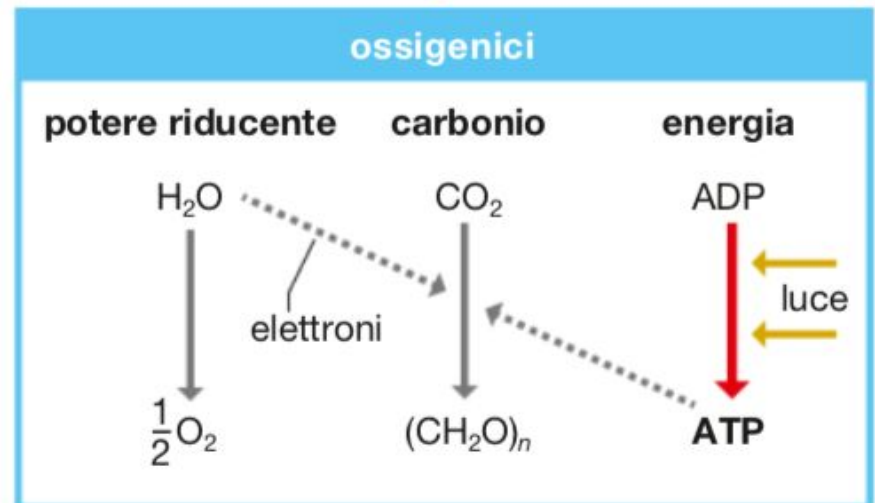
- pigmenti antenna
- centri di reazione
- catena di trasporto di elettroni

Fotosistemi

batteri purpurei rossi e verdi



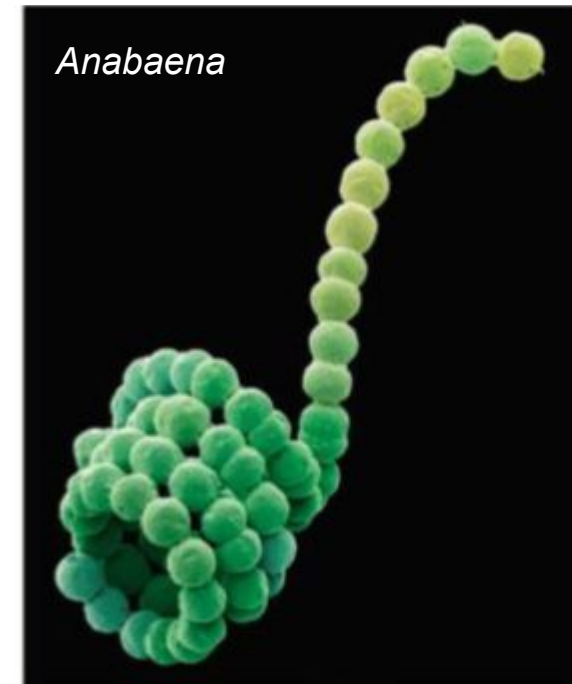
cianobatteri, alghe e piante verdi



# 9. Vie anaboliche: la fototrofia

## Batteri fotosintetici ossigenici (cianobatteri)

- Primi organismi fototrofi produttori di ossigeno
- Gram negativi, a volte filamentosi
- Strutture fotosintetiche: **tilacoidi**
- Pigmenti: clorofilla a, carotenoidi, ficobiline.
- Molte specie possono fissare l'azoto
- *Generi: Oscillatoria, Spirulina, Nostoc, Anabaena, Microcystis*



## 9. Vie anaboliche: la fototrofia


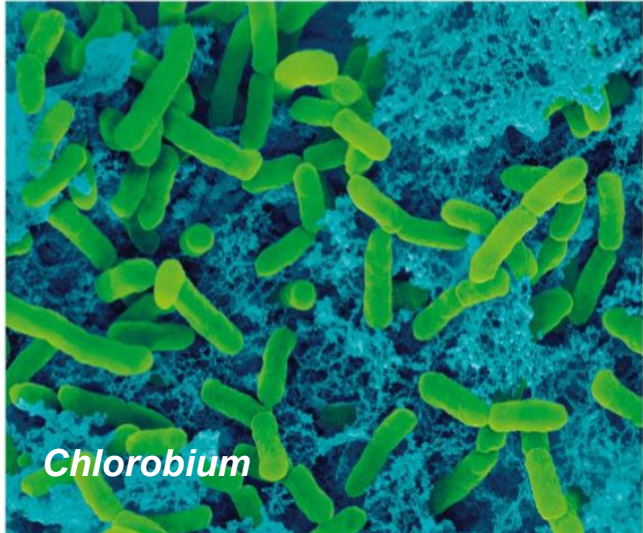
### Batteri fotosintetici ossigenici (cianobatteri)

- Riproduzione per scissione binaria o frammentazione
- Costituiscono i principali componenti del **fitoplancton**
- Possono causare il fenomeno dell' **eutrofizzazione** (*Anabaena*)
- Sono responsabili della comparsa di odori e sapori sgradevoli in acque per il consumo umano
- Alcune specie sono tossinogene
- In associazione con funghi (*ascomiceti*) formano i **licheni**



# 9. Vie anaboliche: la fototrofia

## Batteri fotosintetici anossigenici

	Batteri rossi	Batteri verdi
<b>Sulfurei</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Anaerobi obbligati, Fotolitotrofi anossigenici</li><li>- donatore di elettroni: <math>H_2S</math> o <math>S</math></li><li>- Habitat: sorgenti sulfuree</li><li>- <i>Thiospirillum</i>, <i>Thiocapsa</i>, <i>Chromatium</i></li></ul>  <p><i>Chromatium</i></p>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fototrofi, Azotofissatori</li><li>- donatore di elettroni: <math>H_2S</math> o <math>S</math> o <math>H_2</math></li><li>- Pigmenti: batterioclorofille</li><li>- Habitat: acque di lago e stagno in presenza di solfuri</li><li>- <i>Chlorobium</i></li></ul>  <p><i>Chlorobium</i></p>



# 9. Vie anaboliche: la fototrofia

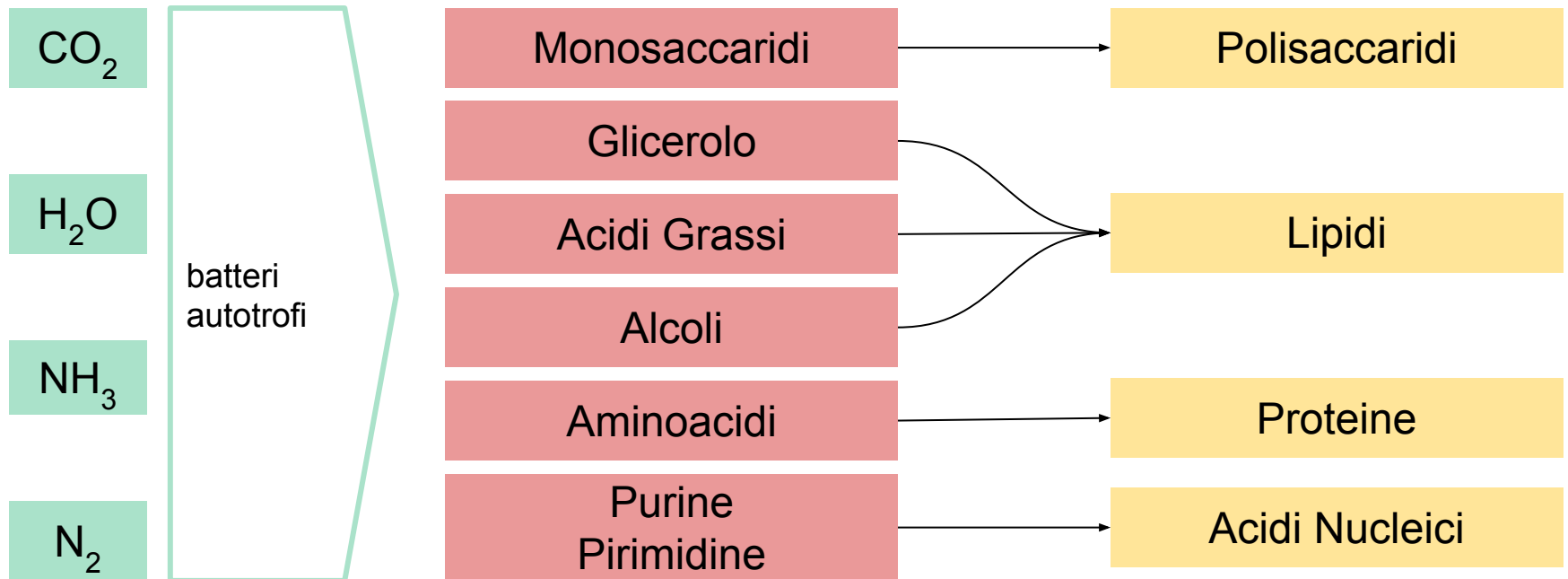
## Batteri fotosintetici anossigenici

	Batteri rossi	Batteri verdi
<b>Non sulfurei</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Anaerobi, Fotoeterotrofi (aerobi chemioeterotrofi in assenza di luce)</li><li>- donatore di elettroni: <math>H_2S</math>, <math>H_2</math>, Fe</li><li>- Habitat: limo, sedimenti, acque dolci</li><li>- <i>Rhodospirillum</i>, <i>Rhodobacter</i>, <i>Rhodoferax</i>.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fototrofi</li><li>- donatore di elettroni: <math>H_2S</math>, <math>H_2</math></li><li>- Forme filamentose e striscianti, termofile</li><li>- Habitat: sorgenti di acqua calda a reazione neutra o alcalina.</li><li>- <i>Chloroflexus</i>, <i>Heliotrix</i>, <i>Thermomicrobium</i></li></ul>

### Eliobatteri

- Fototrofi anossigenici, anaerobi obbligati, azotofissatori (chemioeterotrofi in assenza di luce)
- Producono endospore
- Habitat: suolo, risaie, ambienti alcalini
- *Heliobacterium*, *Heliophilum*

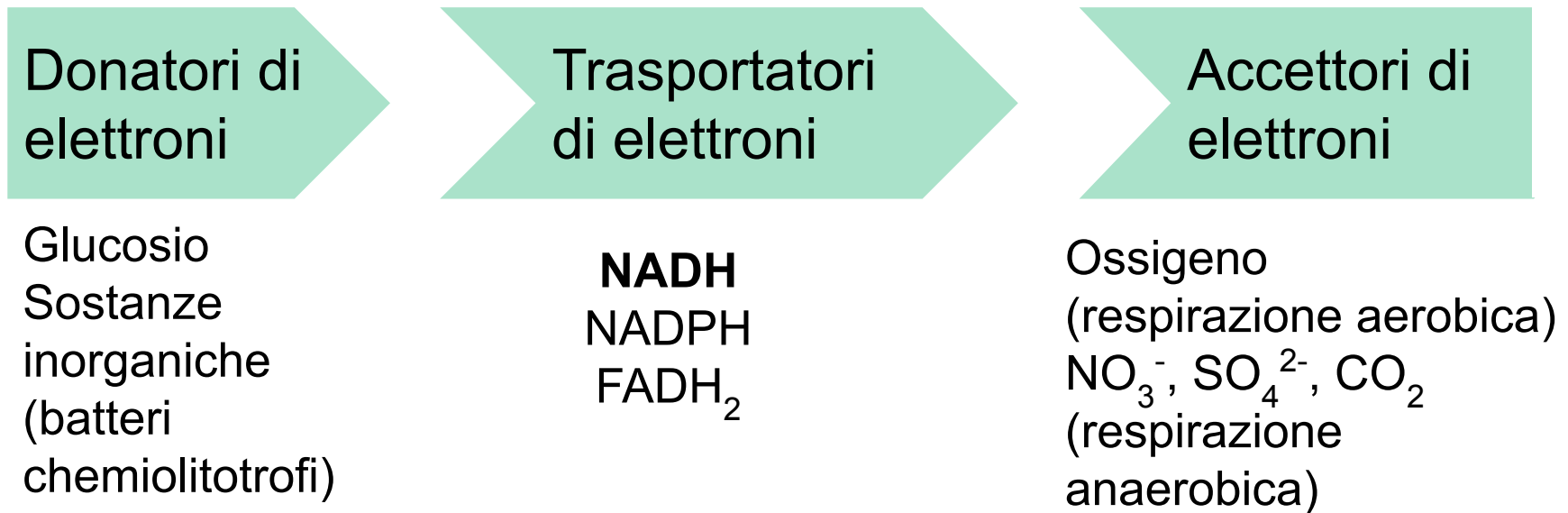
# 10. Vie anaboliche: le biosintesi microbiche



# 11. Le ossidazioni biologiche: fonte di energia

Modalità con cui avvengono le reazioni di ossidazione:

- perdita di elettroni
- addizione di ossigeno
- **rimozione di idrogeno** (forma più utilizzata dalle cellule)



## 12. Vie cataboliche: la glicolisi

Il catabolismo del glucosio è un processo comune a tutti i viventi, e la glicolisi è la via principale.

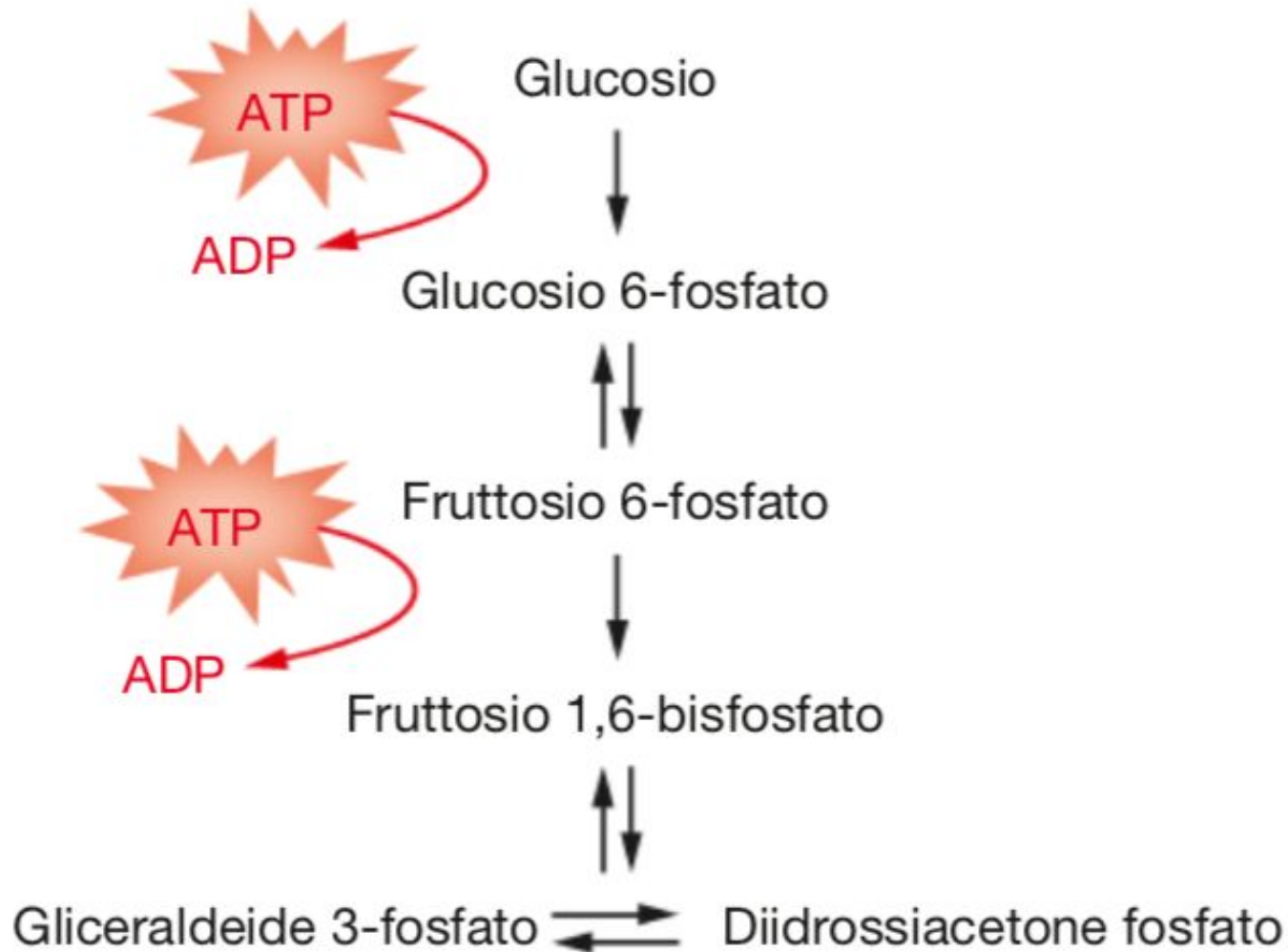
- Ha luogo nel citoplasma
- Degrada una molecola di glucosio ( $C_6H_{12}O_6$ ) in due molecole di acido piruvico ( $C_3H_4O_3$ )
- L'acido piruvico può seguire due destini alternativi:
  - ossidazione (respirazione aerobica)
  - riduzione (fermentazione in anaerobiosi)

## 12. Vie cataboliche: la glicolisi

- Oltre all'acido piruvico vengono prodotte:
  - due molecole di ATP
  - due molecole di NADH
- La glicolisi è costituita da 10 reazioni, suddivise in due fasi, una di preparazione e una di recupero energetico

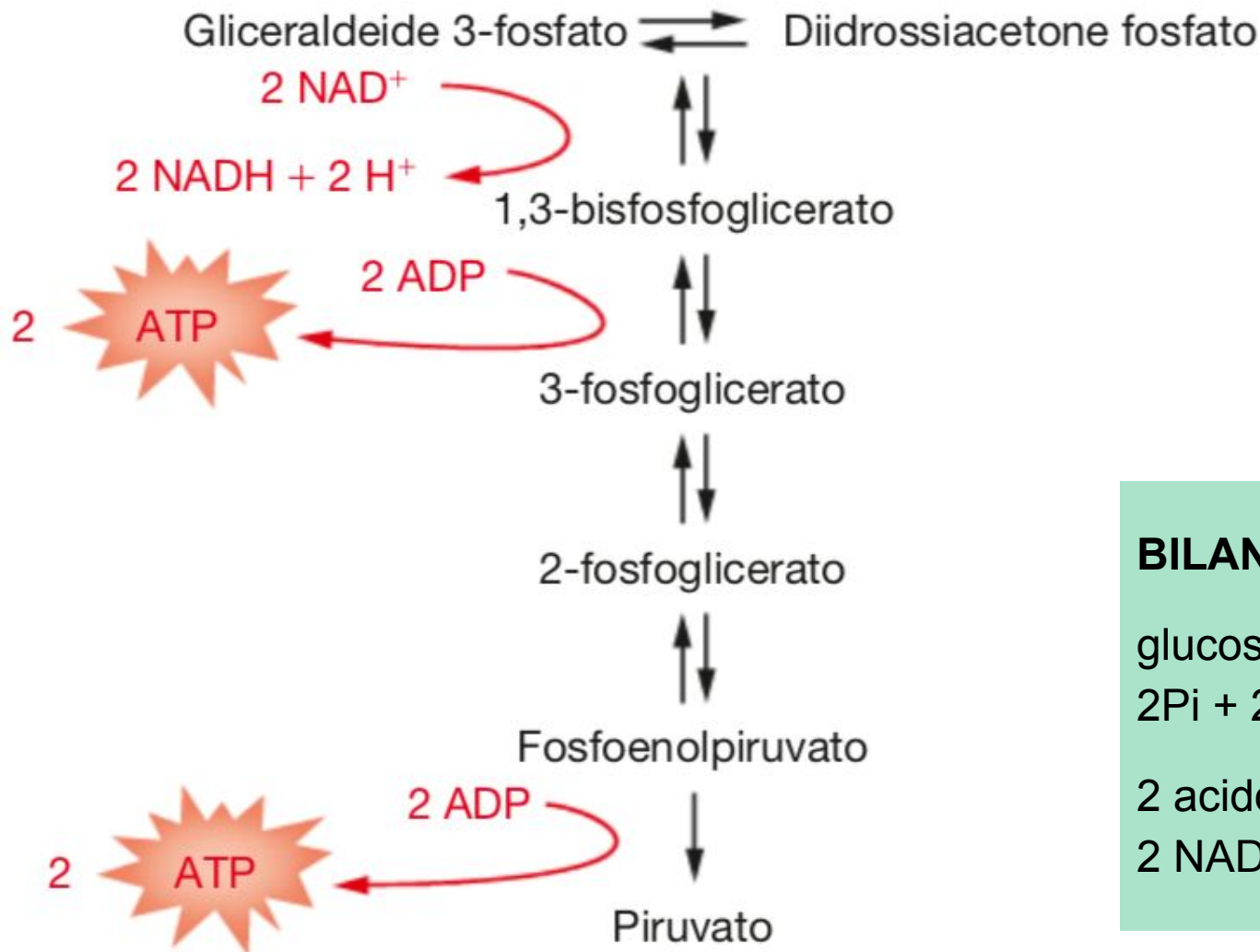
# 12. Vie cataboliche: la glicolisi

## Fase preparatoria

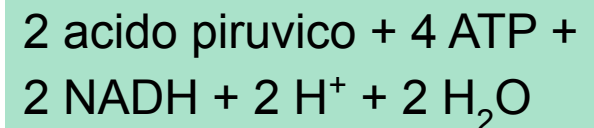
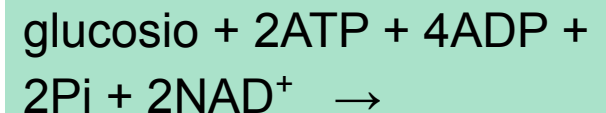


# 12. Vie cataboliche: la glicolisi

## Fase di recupero energetico



### BILANCIO ENERGETICO



# 13. Vie alternative alla glicolisi nei batteri

## Via dei pentoso-fosfati

- Alternativa alla glicolisi
- Avviene sia in aerobiosi che in anaerobiosi
- Indispensabile per la sintesi di carboidrati a 4 o 5 atomi di C.
- Importante per la produzione di NADPH da NADP<sup>+</sup>.
- La G3P è il punto di interconnessione con la glicolisi.

## Via dei *Entner-Doudoroff*

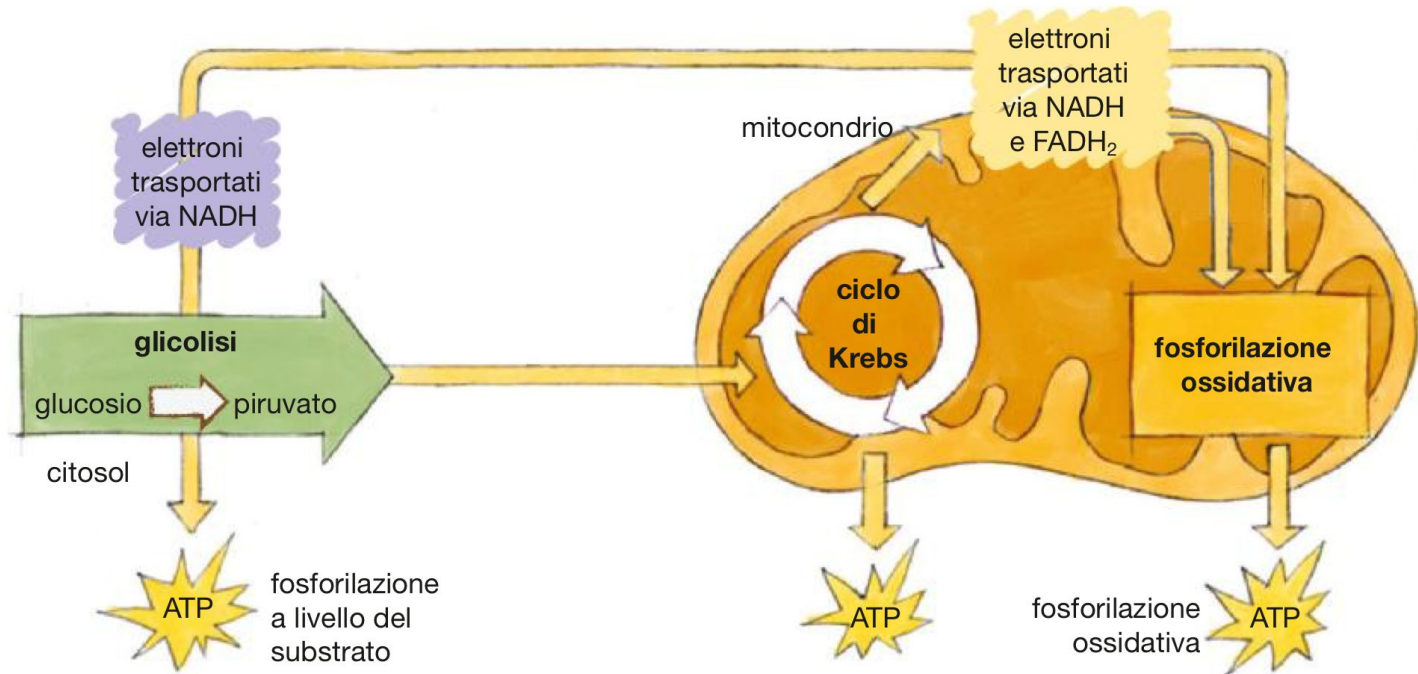
- Alternativa alla glicolisi, solo in alcuni procarioti privi dell'enzima per la sintesi di fruttosio 1,6-PP
- il glucosio-6P viene ossidato ad acido 6-fosfogluconico
- processo aerobico
- La resa energetica è di un solo ATP



# 14. Vie cataboliche: la respirazione cellulare

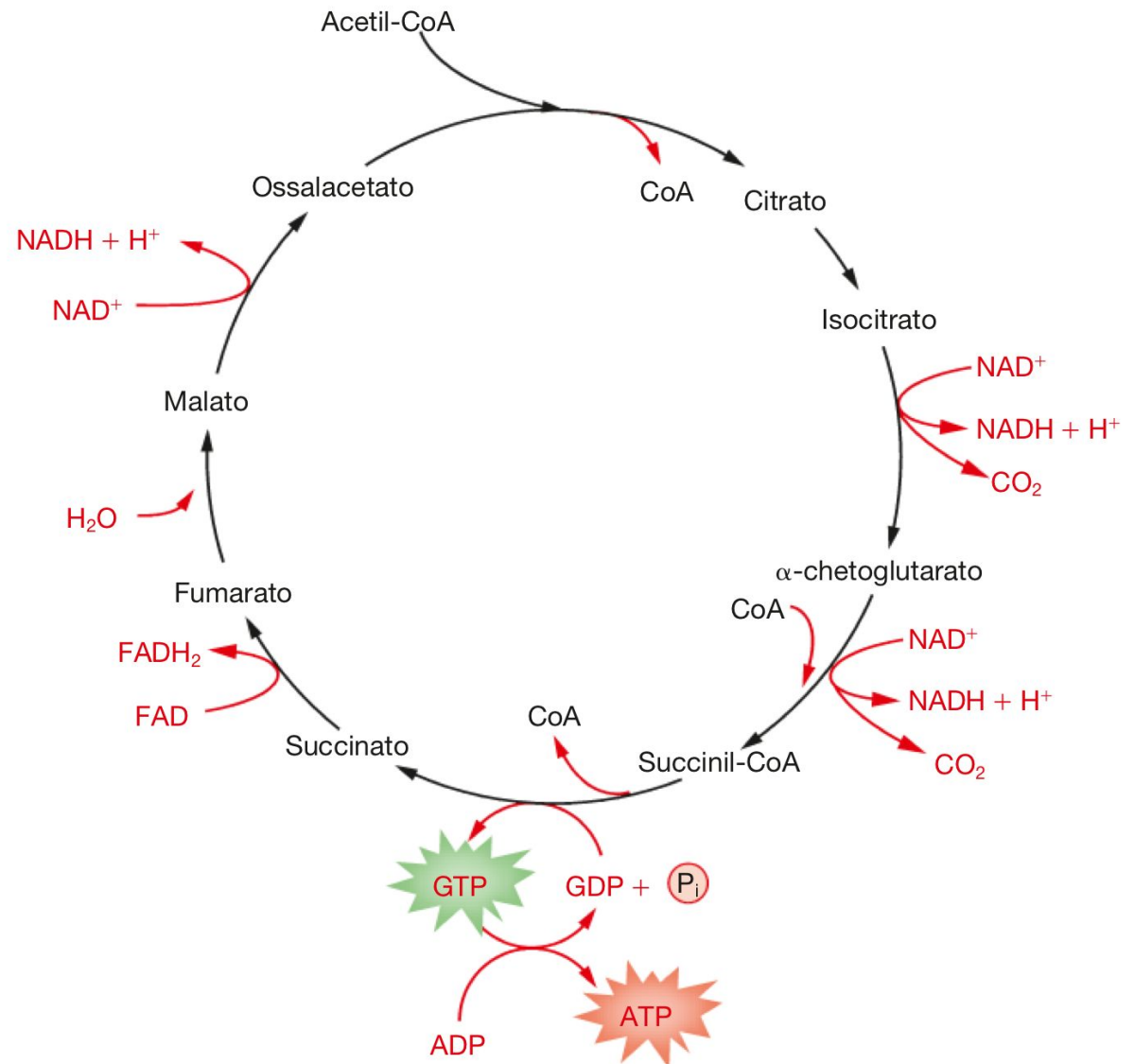
Le reazioni avvengono all'interno dei mitocondri.

- Ossidazione dell'acido piruvico (3C) ad Acetil-CoA (2C)
- Ciclo di Krebs
- Catena di trasporto degli elettroni



# 14. Vie cataboliche: la respirazione cellulare

## Ciclo dell'acido citrico



# 14. Vie cataboliche: la respirazione cellulare

## Catena di trasporto degli elettroni

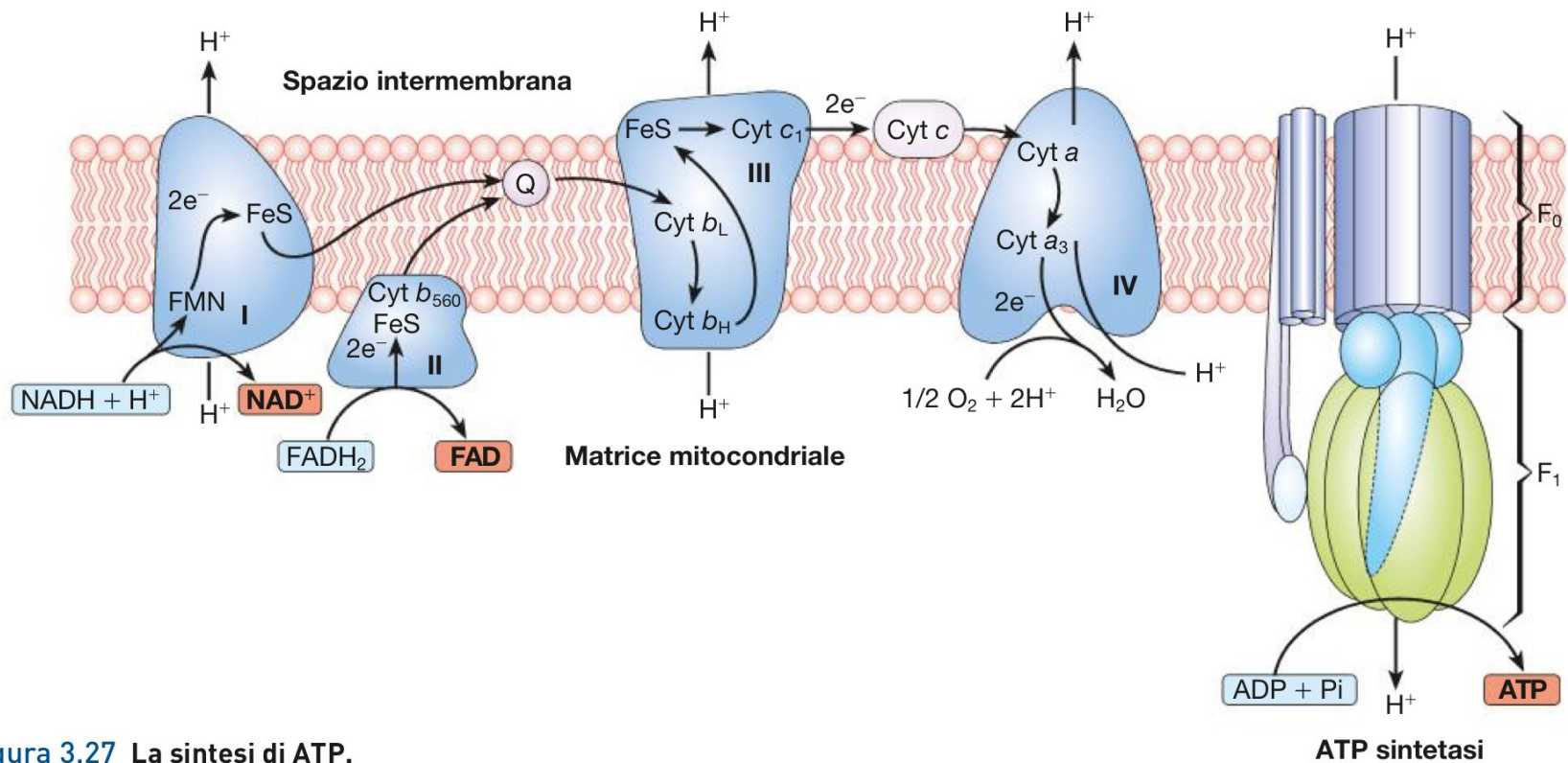


Figura 3.27 La sintesi di ATP.

# 15. Vie cataboliche: la respirazione anaerobica

Riduzione di composti in assenza di ossigeno.

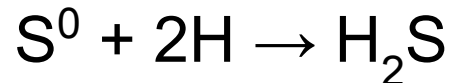
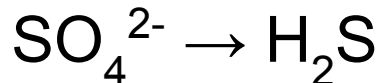
- **assimilativa**: i composti sono usati come nutrienti
- **dissimilativa**: i composti sono usati come fonte di energia

## NITRATI ( $\text{NO}_3^-$ ) - batteri denitrificanti

- Denitrificazione:  $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$
- Anammox:  $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$

Queste reazioni sono utili nella depurazione delle acque reflue, e quando è necessario rimuovere ammoniaca dall'ambiente, ma risultano svantaggiose nel suolo, perchè impoveriscono il terreno

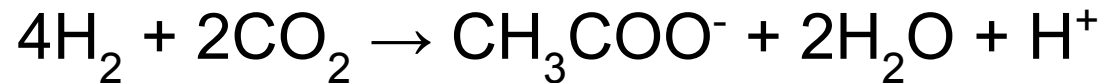
## SOLFATI ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) - batteri solfato-riduttori



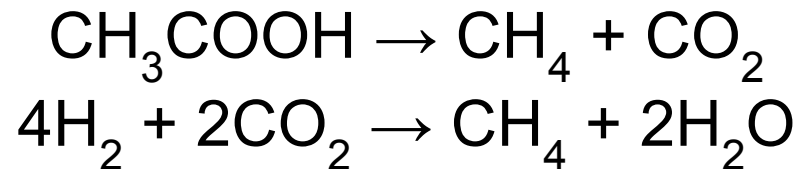
# 15. Vie cataboliche: la respirazione anaerobica

## Produzione di acetato - batteri acetici e acetogeni

I batteri acetici producono acido acetico a partire da zuccheri ed alcool, i batteri acetogeni usano la “via dell’Acetil CoA”.



## Metanogenesi - *Archaea* metanogeni



Produzione  
di biogas

# 16. La chemiolitotrofia: energia da sostanze inorganiche

**Chemiolitotrofia:** ossidazione di molecole inorganiche.

- I batteri chemiolitotrofi hanno un ruolo rilevante nei **cicli biogeochimici**.
- L'ATP viene prodotta con catene di trasporto di elettroni similmente alla respirazione aerobica.

**IDROGENO** (idrogenobatteri):  $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

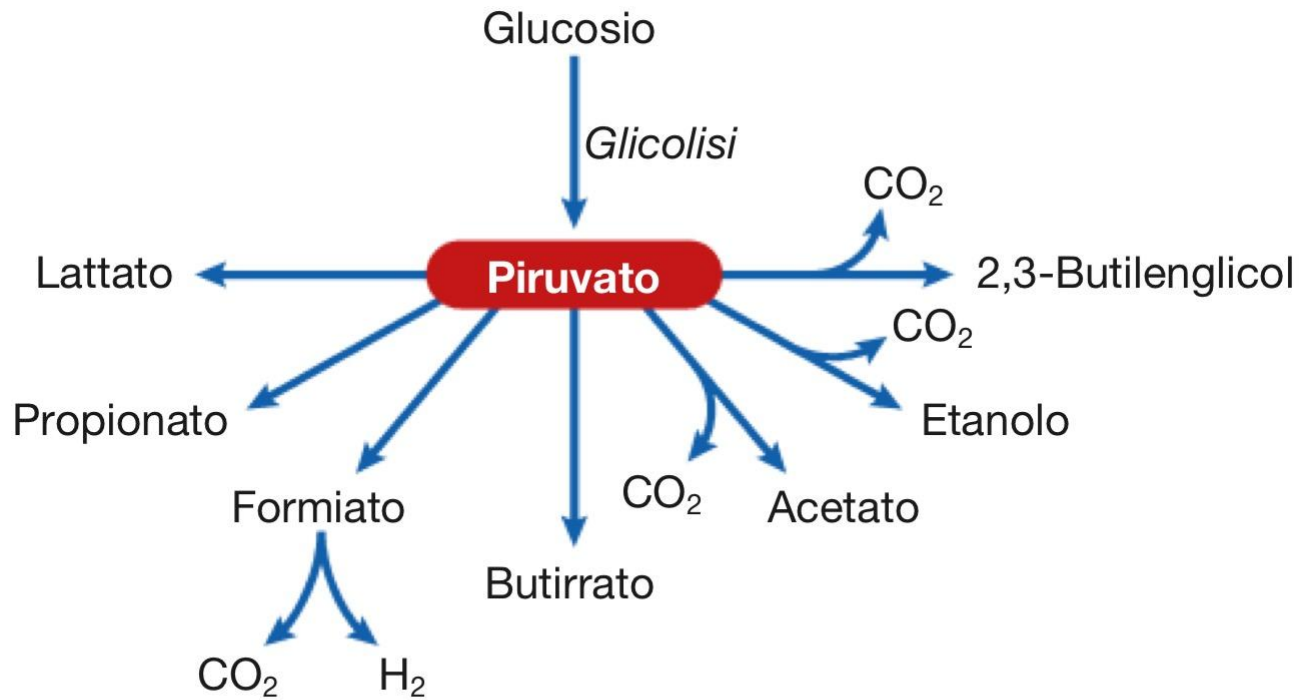
**ZOLFO** (solfobatteri incolori):  $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \text{ o } \text{S}^0$

**FERRO** (ferrobatteri):  $\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$

La reazione provoca acidificazione nell'ambiente

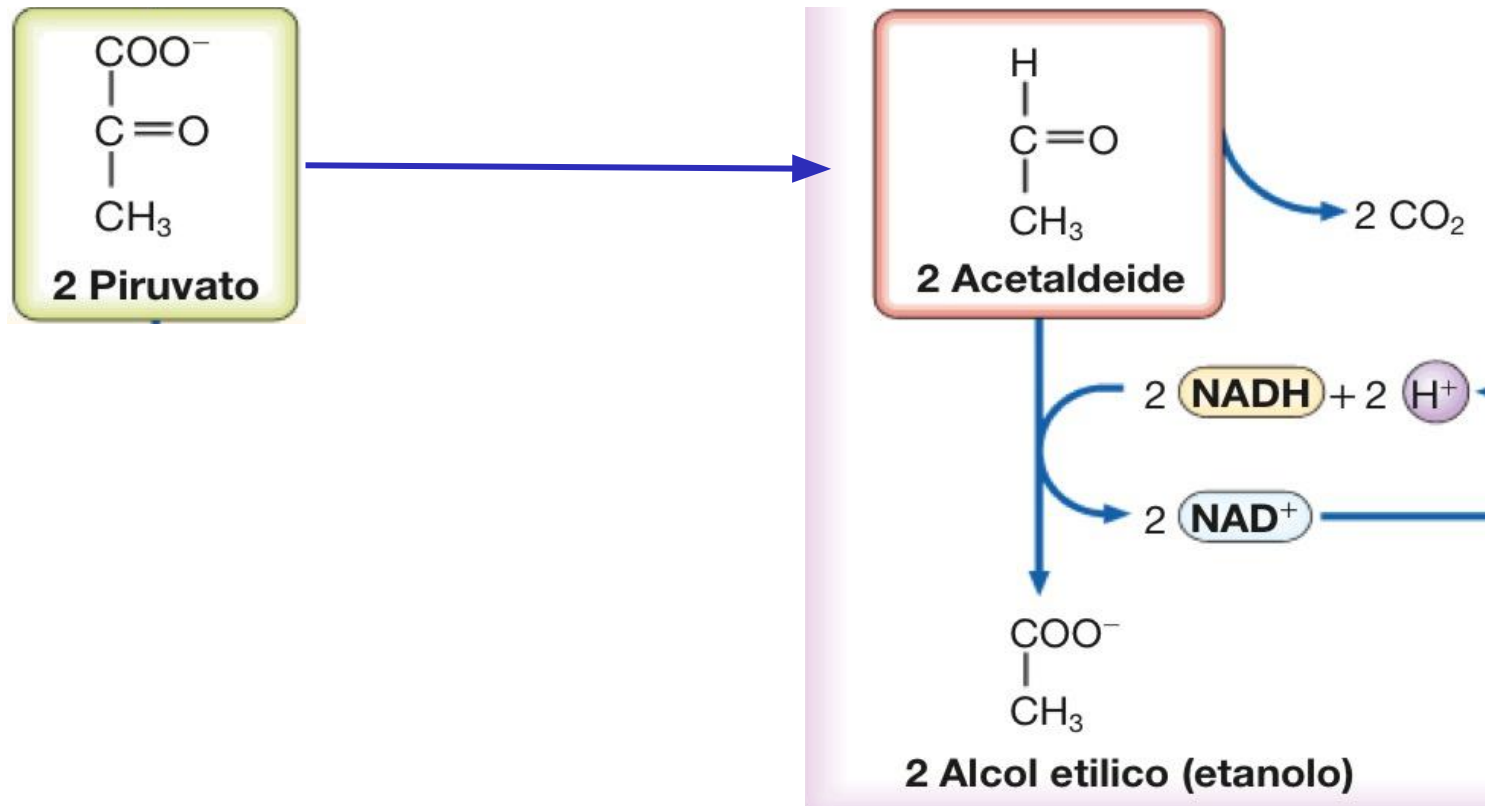
# 17. Vie cataboliche: la fermentazione microbica

**Scopo della fermentazione:** riossidare il NADH a NAD<sup>+</sup> (se non avvenisse, si bloccherebbe la glicolisi)



# 17. Vie cataboliche: la fermentazione microbica

## Fermentazione alcolica

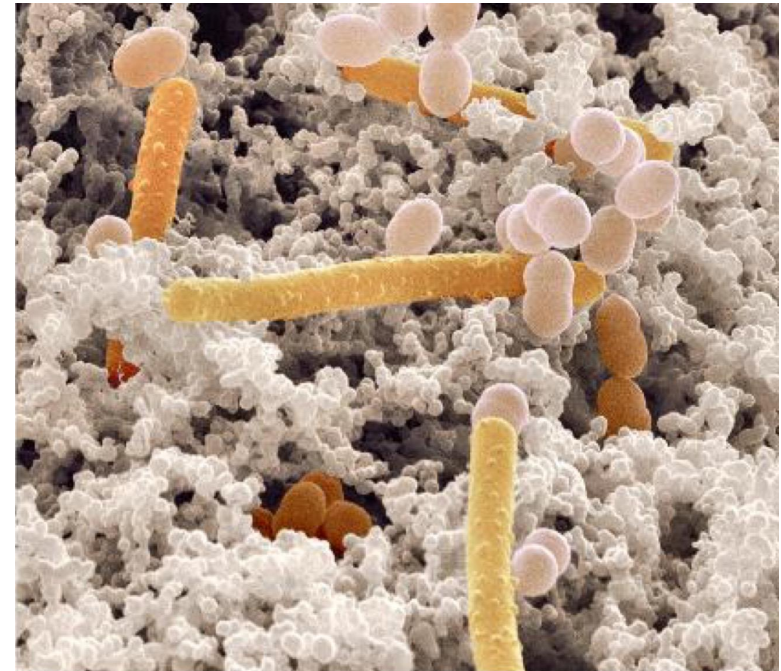
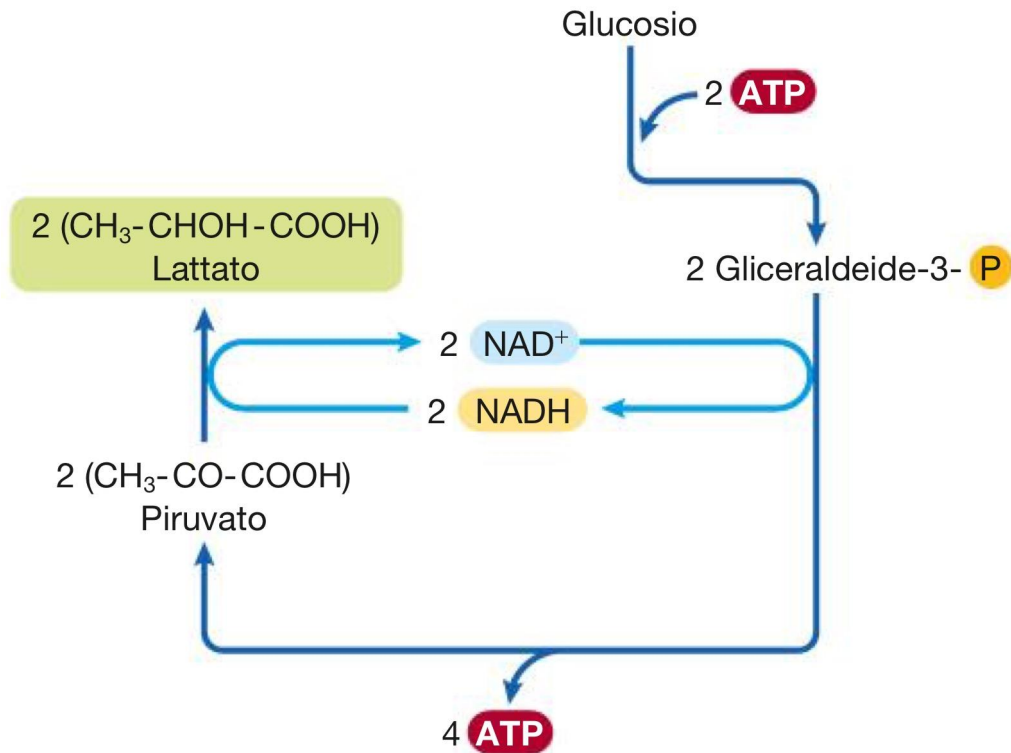


Fermentazione	Principali prodotti dell'acido piruvico	Microrganismi	Principali applicazioni da parte dell'uomo
Alcolica	Etanolo $\text{CO}_2$	Lieviti	Produzione di bevande alcoliche Panificazione



# 17. Vie cataboliche: la fermentazione microbica

## Fermentazione omolattica



Fermentazione	Principali prodotti dell'acido piruvico	Microrganismi	Principali applicazioni da parte dell'uomo
Omolattica	Acido lattico	Molti batteri lattici: <i>Streptococcus</i> <i>Pediococcus</i> alcuni <i>Lactobacillus</i>	Prodotti lattiero-caseari Prodotti vegetali fermentati (crauti, sottaceti)

# 17. Vie cataboliche: la fermentazione microbica

Fermentazione	Principali prodotti dell'acido piruvico	Microrganismi	Principali applicazioni da parte dell'uomo
Acido mista	Acidi lattico, acetico, succinico, formico $\text{CO}_2 + \text{H}_2$	Molti enterobatteri, inclusi: <i>Escherichia</i> <i>Salmonella</i> <i>Shigella</i> <i>Enterobacter</i> <i>Yersinia</i>	Utilizzata per identificare i batteri della famiglia delle <i>Enterobacteriaceae</i>
Butirrica	Acido butirrico, acido acetico $\text{CO}_2$ $\text{H}_2$	<i>Clostridium</i> <i>Fusobacterium</i>	Processi di macerazione per fibre tessili
Propriónica	Acido propionico, acido acetico, acido succinico $\text{CO}_2$	<i>Propionibacterium</i> <i>Veillonella</i>	Produzione di alcuni formaggi tipo emmenthal
Aceton butilica	Butanolo, acetone, isopropanolo, etanolo	Alcuni clostridi	Produzione di acetone ed etanolo
Butandiolica	2,3-butandiolo $\text{CO}_2$	<i>Enterobacter</i> <i>Serratia</i> <i>Erwinia</i> <i>Aeromonas</i>	Utilizzata per identificare i batteri della famiglia delle <i>Enterobacteriaceae</i>