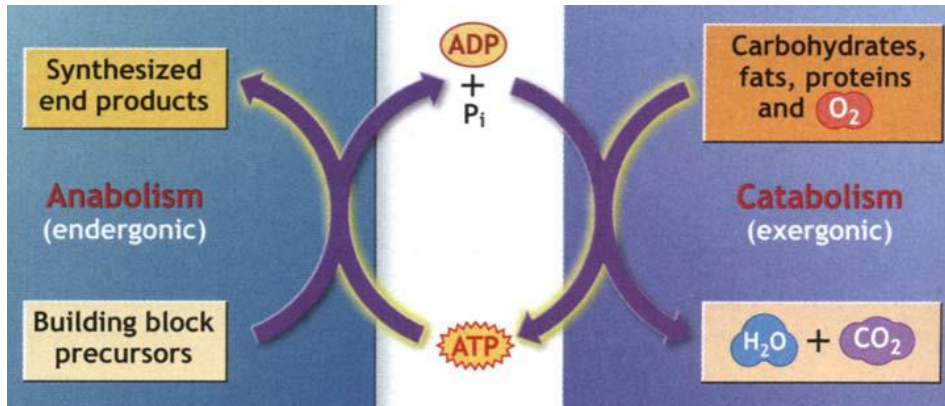
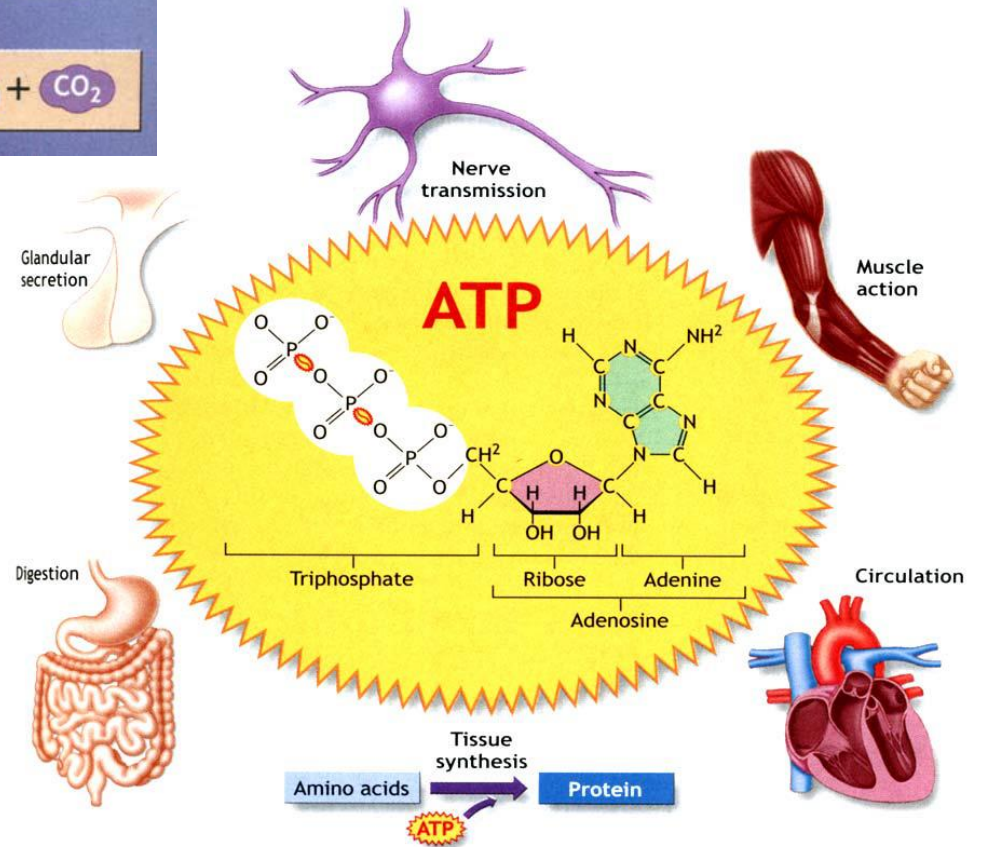


Metabolisme muscular

• Aliments i nutrients

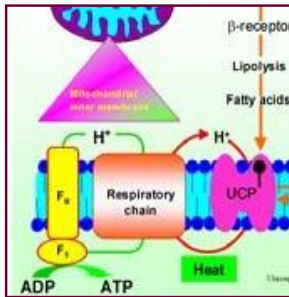
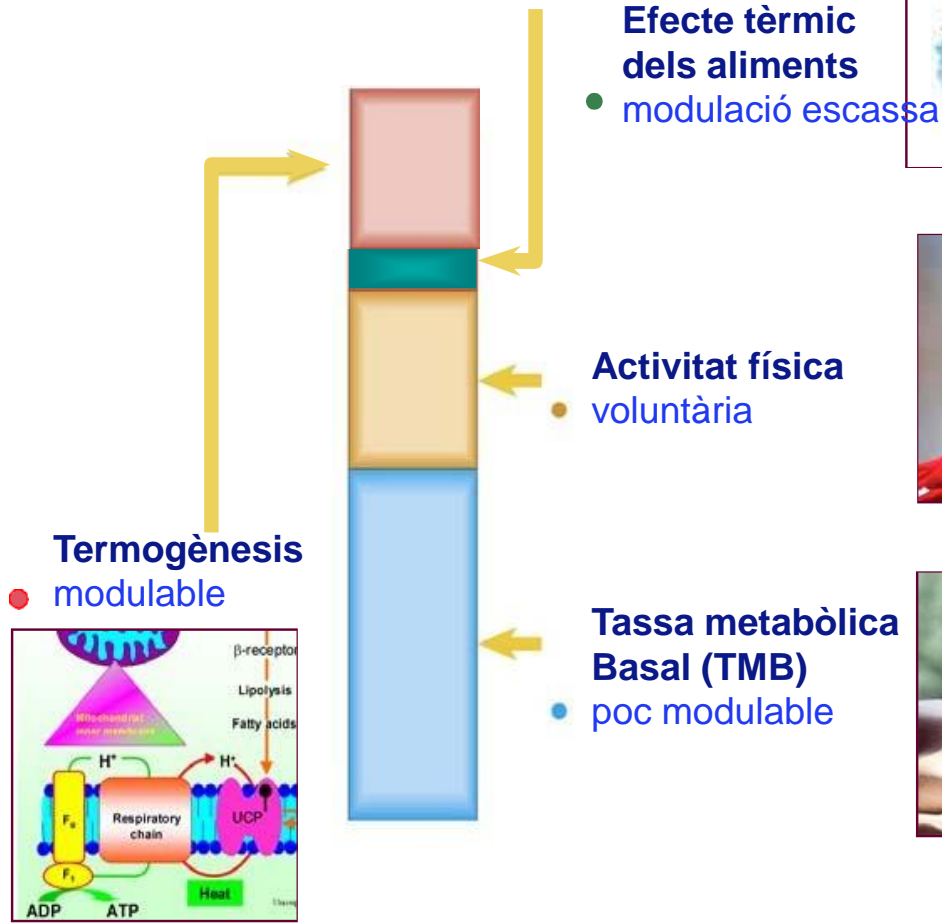


- La **vida** es possible gràcies a un aport d'energia.
- Les espècies **animals** obtenim l'**energia** a partir dels **nutrients** del mitjà, mitjançant transformacions (metabolisme) que poden ser o no dependents d'**oxigen** (aeròbic vs. anaeròbic).



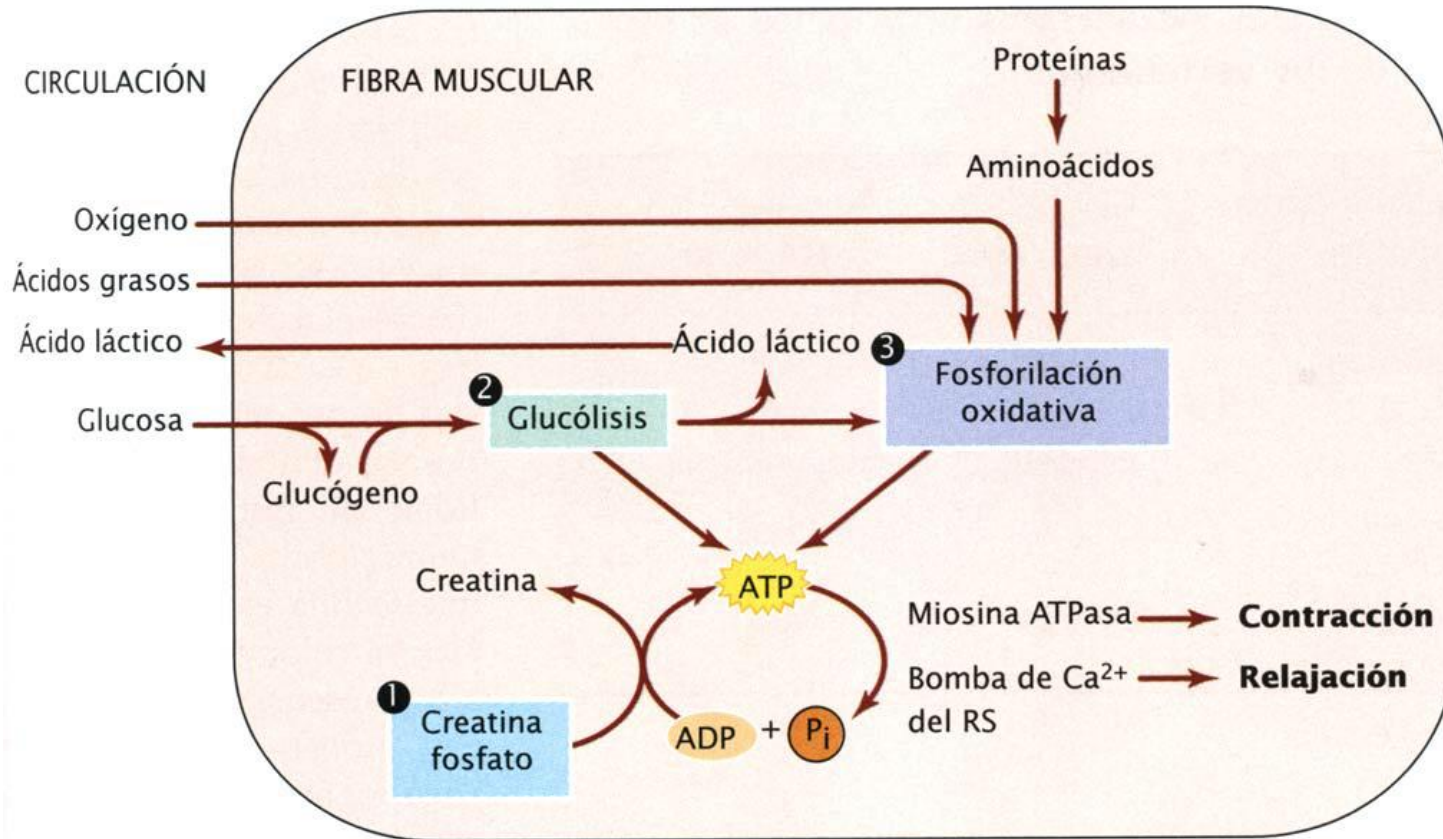
Metabolisme muscular

• Aliments i nutrients



• Metabolisme muscular

• Aliments i nutrients

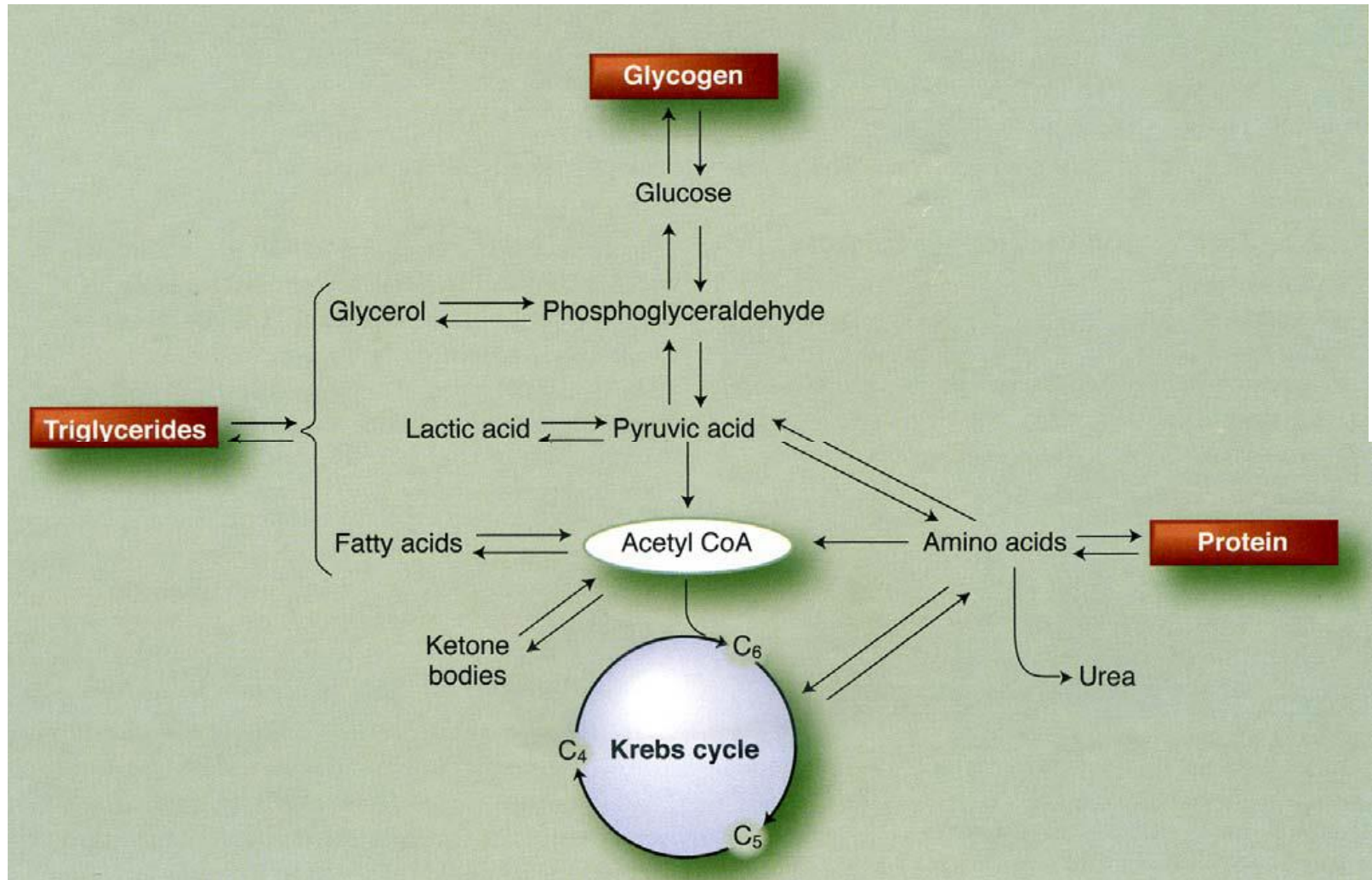


- L'aport energètic es basa en la utilització dels macronutrients de la dieta: **carbohidrats, greixos i proteïnes**.
- La utilització de la **glucosa** pot ser tant aeròbica com anaeròbica. El metabolisme **proteic i dels greixos** és sempre aeròbic.

- **Metabolisme muscular**

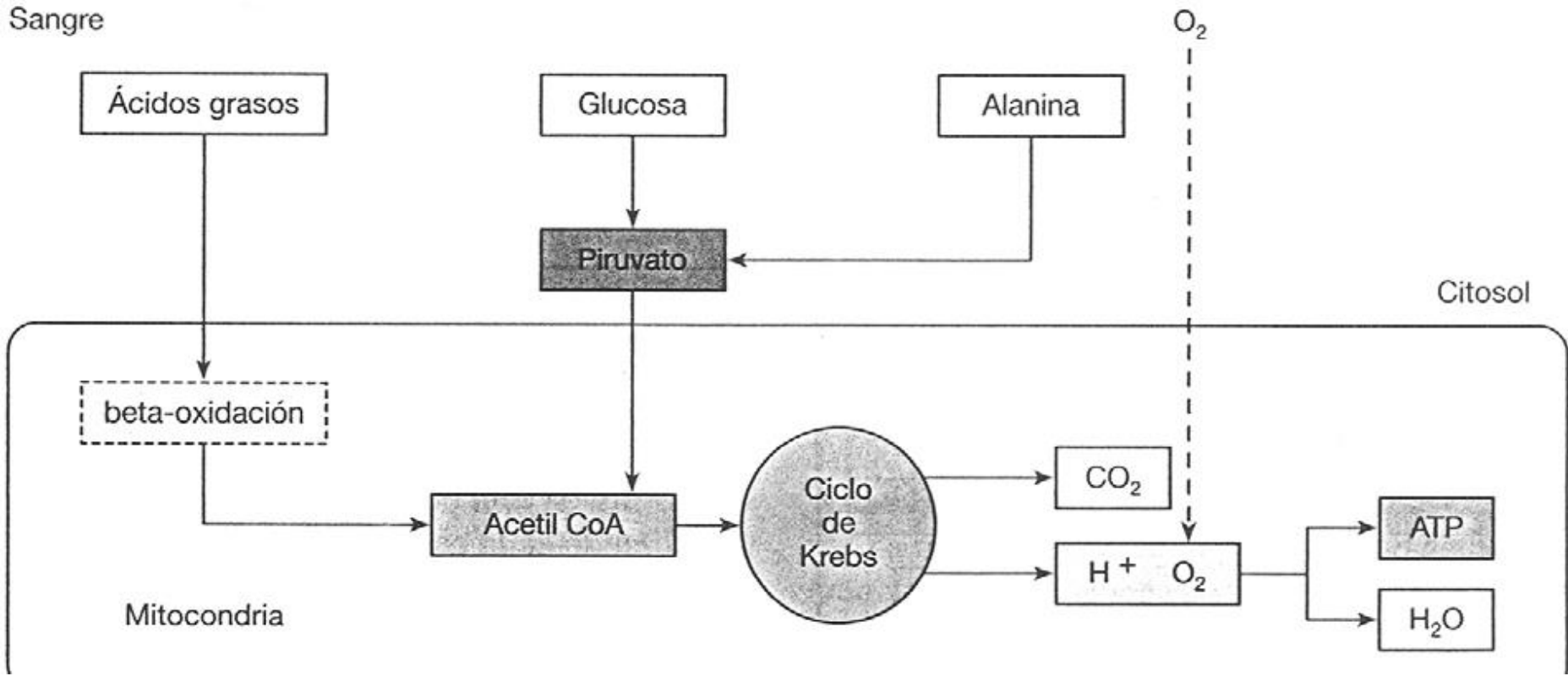
- **Aliments i nutrients**

El metabolisme dels hidrats de carboni, els greixos i les proteïnes comparteixen rutes metabòliques. Tots són reduïts a **Acetil CoA** o d'altres intermediaris del cicle de Krebs.



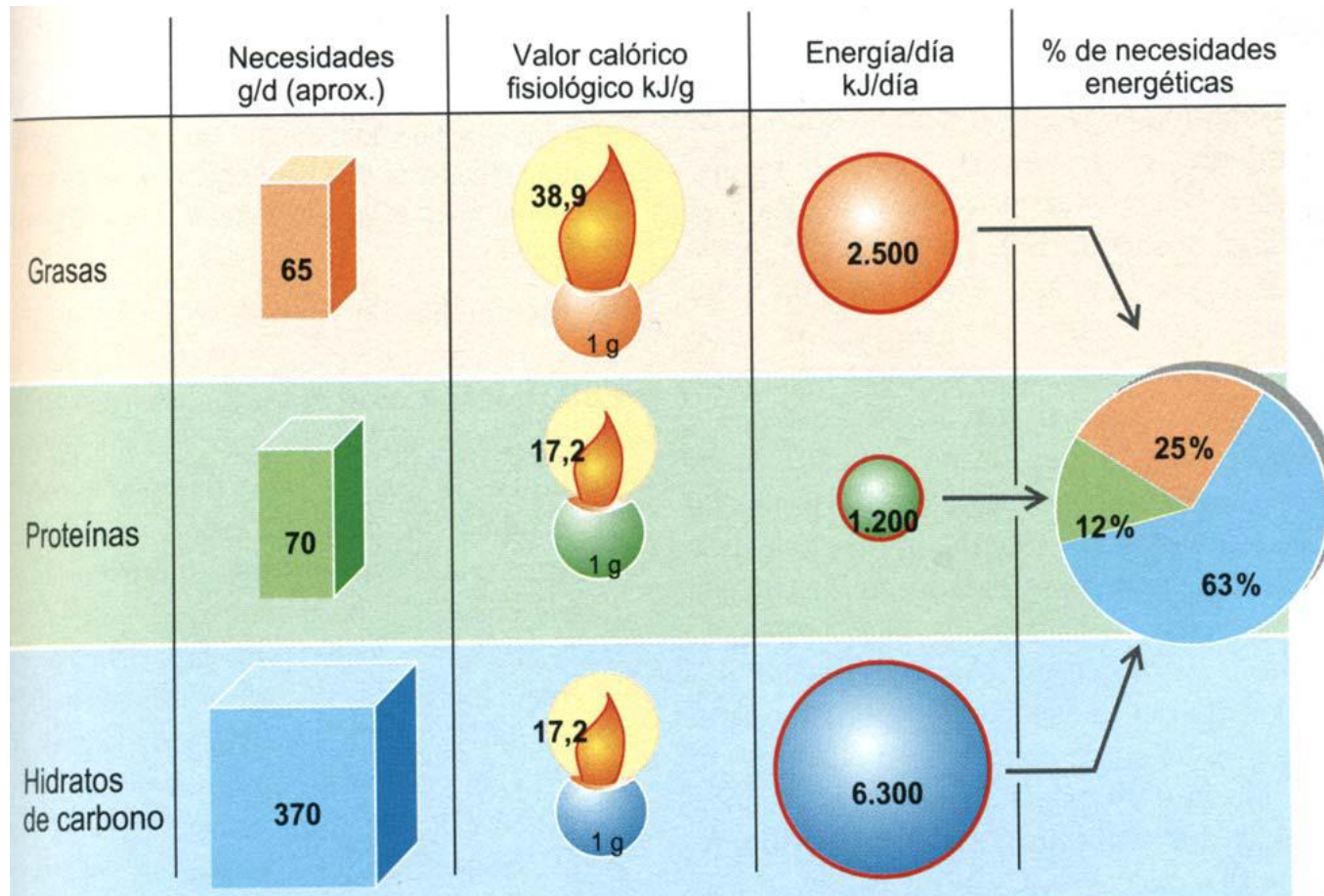
• **Metabolisme muscular**

• **Aliments i nutrients**



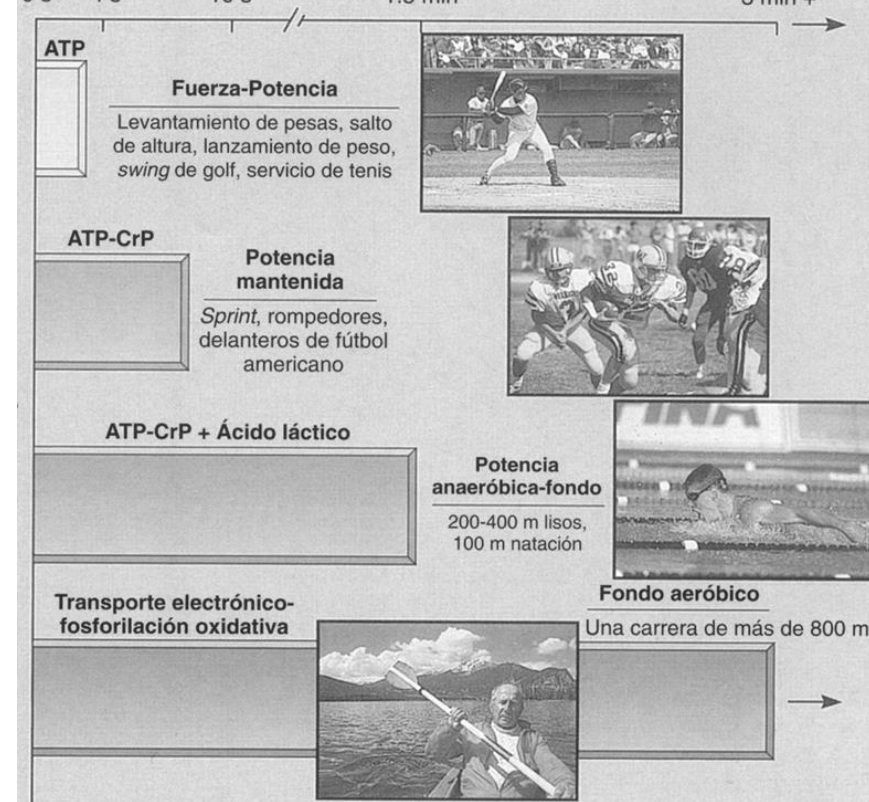
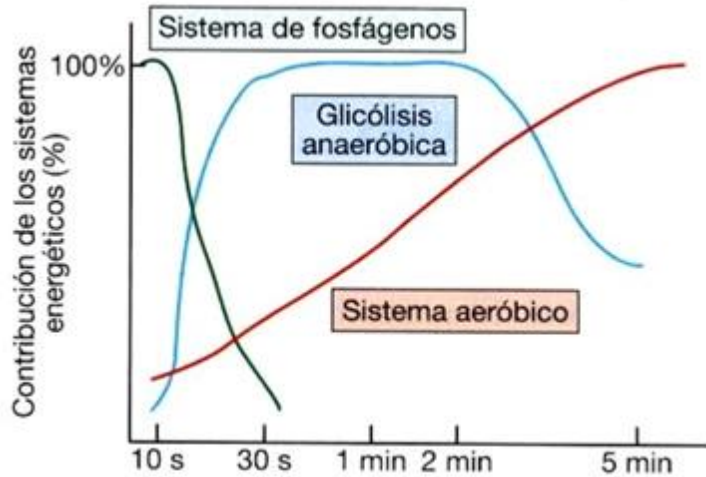
• Metabolisme muscular

• Aliments i nutrients



- Els **carbohidrats** (un 90% d'ells glucosa) constitueixen la principal font energètica. Aportant unes 4 Kcal/g.
- Els **greixos** (majoritàriament triglicèrids) representen el 25% de l'aport energètic. Aporten unes 9 Kcal/g.
- Les **proteïnes** aporten poc a la nostra energia. Paper principalment estructural, encara que aporten unes 4 Kcal/g.

- **Metabolisme muscular**
- **Sistemes energètics**



□ Els **sistemes energètics** disponibles es basen en l'ús de les reserves musculars de **fosfàgens** (ATP i fosfocreatina), l'ús **anaeròbic** de les reserves de glucogen muscular, o la utilització **aeròbica** de glucosa, greixos i proteïnes.

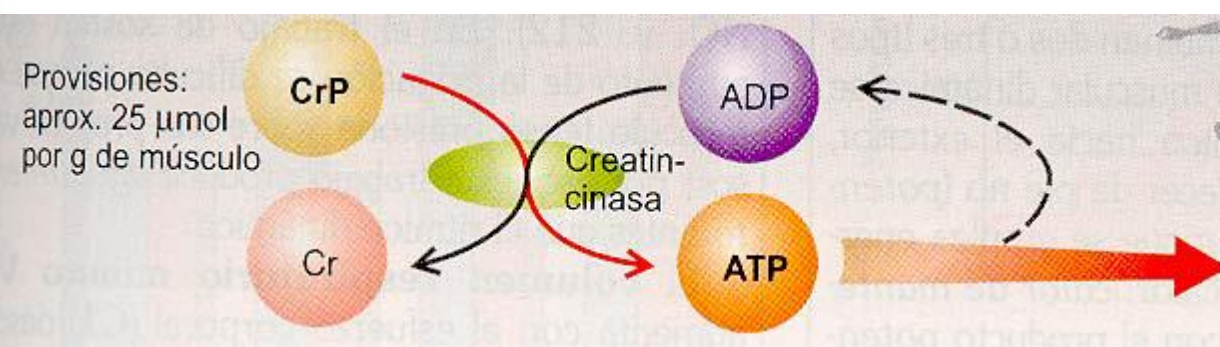
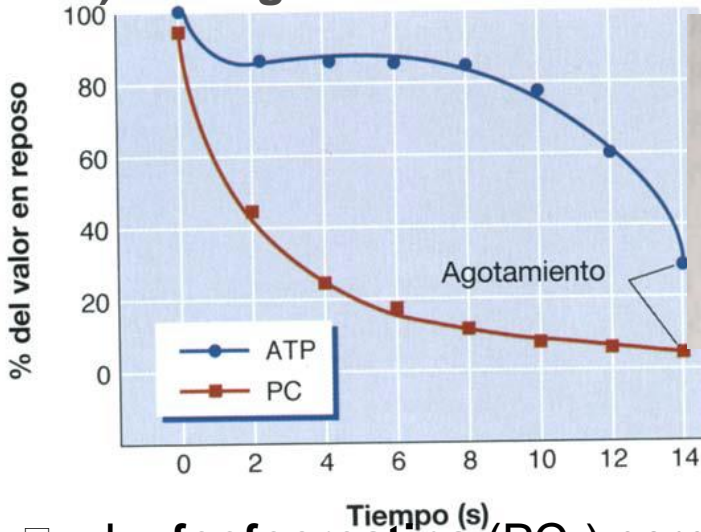
□ La **intensitat** de l'exercici realitzat determina la utilització relativa de cadascun dels sistemes disponibles.

- 1) Sistema de **fosfàgens**: síntesis de ATP a partir de **PCr** i **ADP** **Anaeròbic**.
- 2) **Glucòlisis anaeròbica** (a partir de **GLUCOSA**) **Anaeròbic**.
- 3) **Fosforilació oxidativa** (a partir de **GLUCOSA, ÀCIDOS GRASOS Y AMINOÁCIDOS**) **Aeròbic**.

- Els **sistemes energètics** utilitzats depenen del compromís entre la demanda energètica i la velocitat de producció.

- Los sistemes **oxidatius** depenen de l'aport d'oxigen, impliquen processos més laboriosos i major nombre d'estructures.

1) Fosfàgens



- La **fosfocreatina** (PCr) permet la generació extremadament ràpida d'ATP. Representa una **reserva** muscular d'ATP.
- S'utilitza **al principi** de la contracció: Proves de petita durada i elevada intensitat.
- S'**esgota** ràpidament.
- La **creatinquinasa** se activa al augmentar [ADP]. La concentració de PCr en fibres tipus I és menor. 120 gr totals en el múscul.
- El 95% de la creatina sintetitzada pel fetge va al múscul. El 5% restant va a encèfal, cor i testicles. 2 gr en plasma.
- La **creatina** abunda en carn vermella i peix. Suplements de PCr milloren resultats en esports amb moviments intensos. Dosis elevades produeixen mal renal. La degradació de creatina genera creatinina, utilitzada com marcador de l'activitat renal.

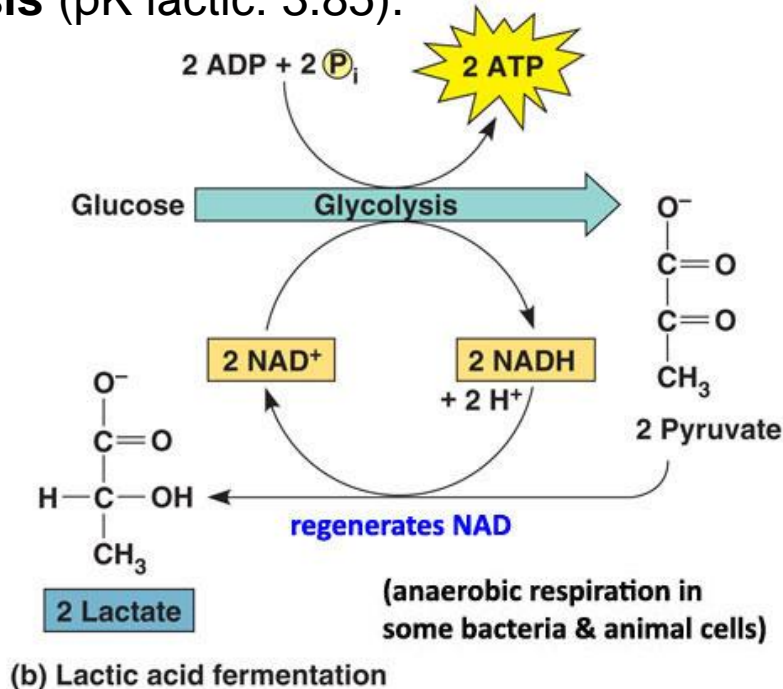
• Metabolisme muscular

2) Glucòlisis anaeròbica

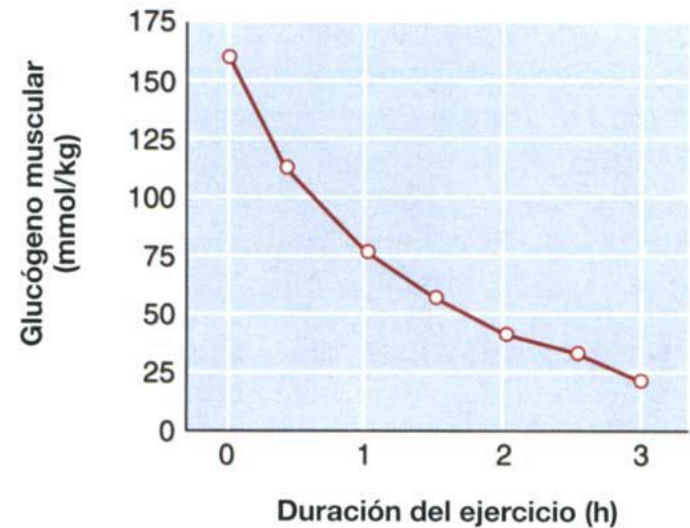
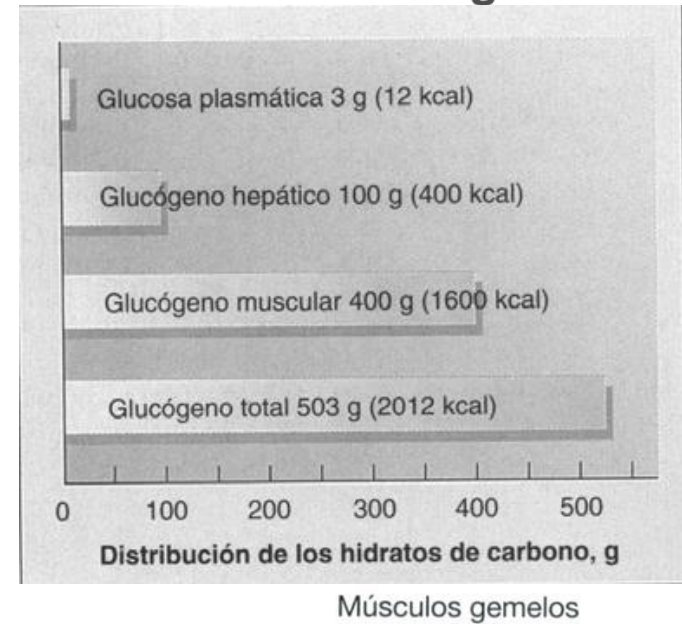
- Producció **ràpida** de ATP.
- Regenera NAD^+

Inconvenients:

- Baix **rendiment** energètic.
- **Esgota** las fonts de **glucogen**
- **Acidosis** (pK làctic: 3.85).



• Sistemes energètics

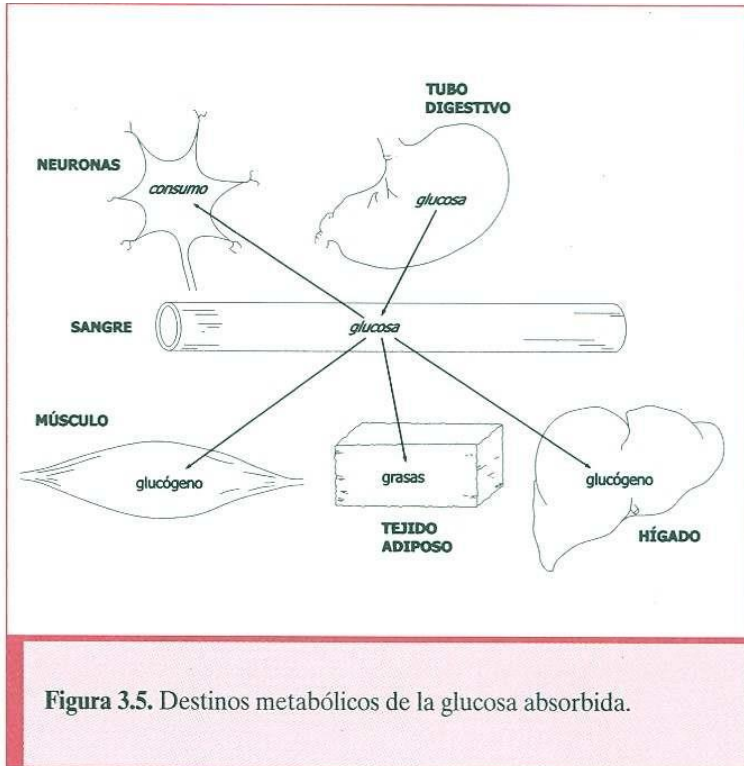


- La glucòlisis anaeròbica permet la formació **ràpida** de ATP en exercici intens, després d'esgotar la fosfocreatina.
- La glucòlisis anaeròbica implica l'ús anaeròbic de les reserves de **glucogen** muscular, solament utilitzable pel **múscul**

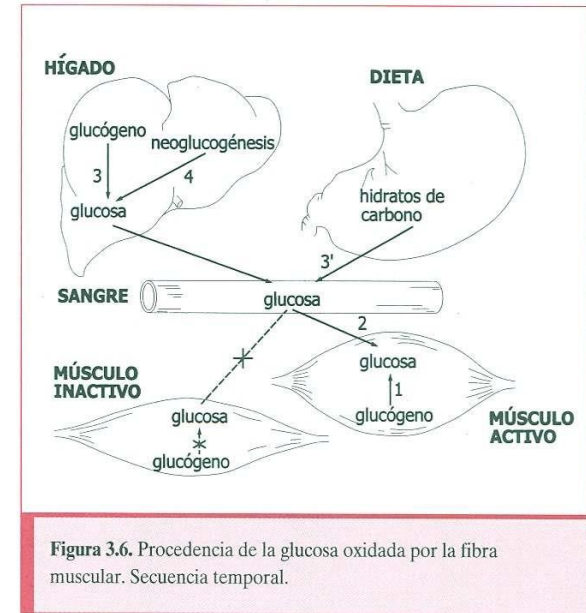
• Metabolisme muscular

2) Glucòlisis anaeròbica

¿Cóm es proveeix el múscul de glucosa?



• Sistemes energètics



- 1- **Glucogenòlisis** muscular (solament de fibres actives)
- 2- Glucosa sanguínia que ve de:
- 3'- **ingesta** de carbohidrats
- 3- **glucogenòlisis hepàtica**
- 4- **gluconeogènesis**

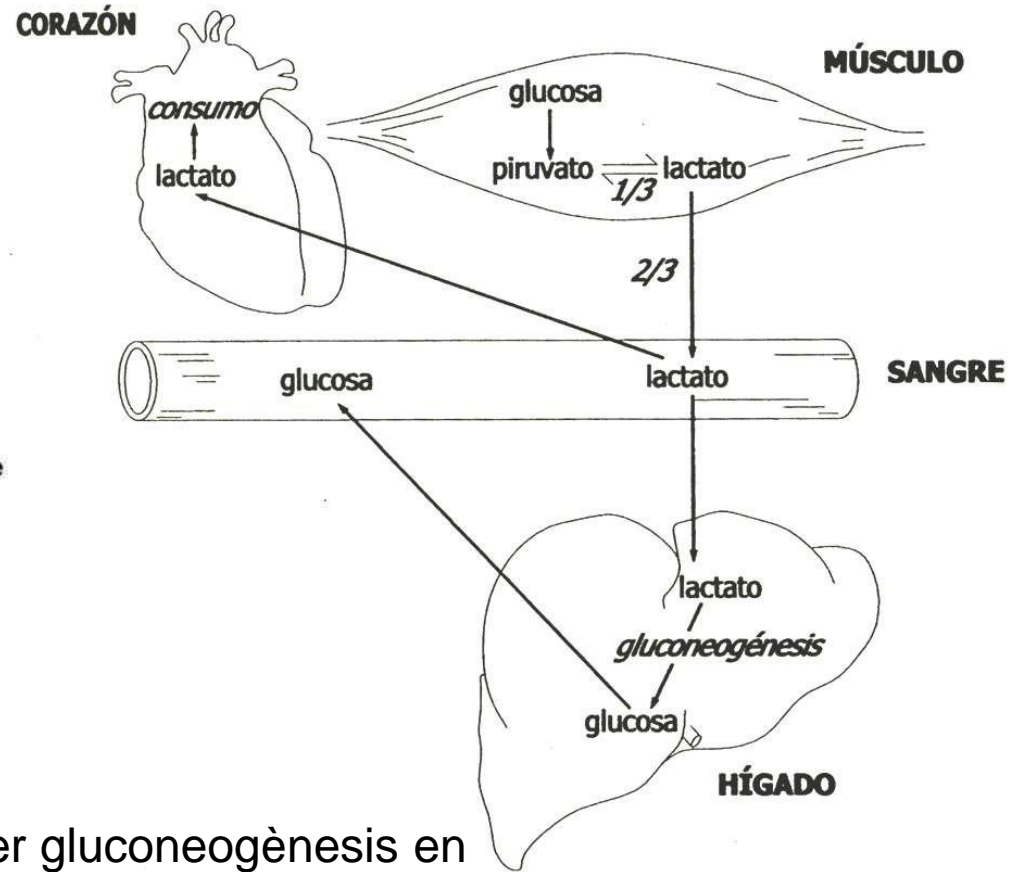
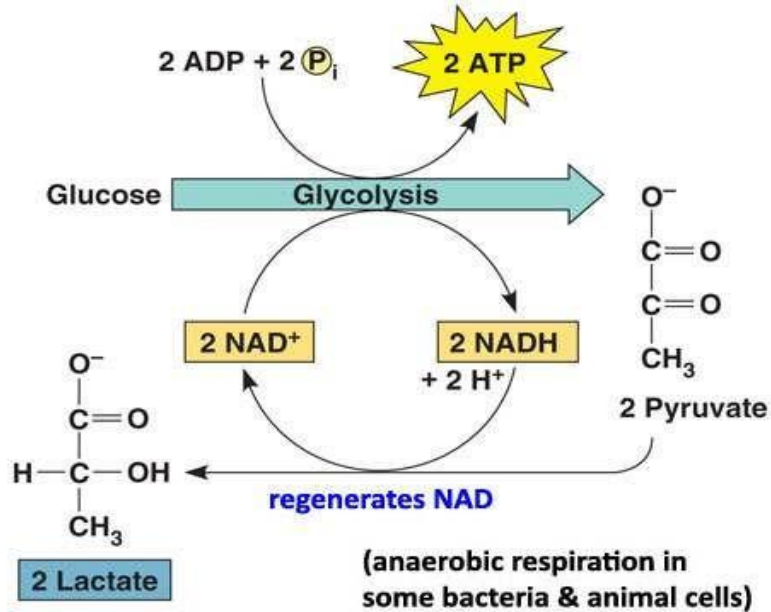
Glucogenòlisis: Formació de glucosa a partir de glucogen.

Glucogènesis: Formació de glucogen a partir de glucosa

Gluconeogènesis: Formació de glucosa a partir de precursors no glucàrics (, àcid làctic...)

• Metabolisme muscular

Energia a curt termini: sistema de l'àcid làctic



- Lactat en sang per produir glucosa per gluconeogènesis en el **Fetge (cicle de Cori)**.
- La major part del lactat és utilitzat pel múscul **cardíac**.
- Part del lactat produït en una fibra pot ser circulat a altra (**llançadora de lactat**) convertit a piruvat i aquest a acetil-CoA que ingressa al cicle de Krebs.

Destí del lactat muscular: el lactat sanguini **com a font d'energia**

- **Metabolisme muscular**

Energia a curt termini: sistema de l'àcid làctic

Acumulació de lactat en sang: condicions en les que la **producció de lactat supera la seva eliminació**.

Umbral sanguini del lactat (LT)

Intensitat d'exercici a partir de la qual el lactat sanguini comença a acumular-se en un exercici d'intensitat creixent.

L'exercici a la intensitat de l'umbral sanguini de lactat representa la màxima intensitat a la que l'exercici estable es pot mantenir (es pot saber el rendiment de l'exercici aeròbic)

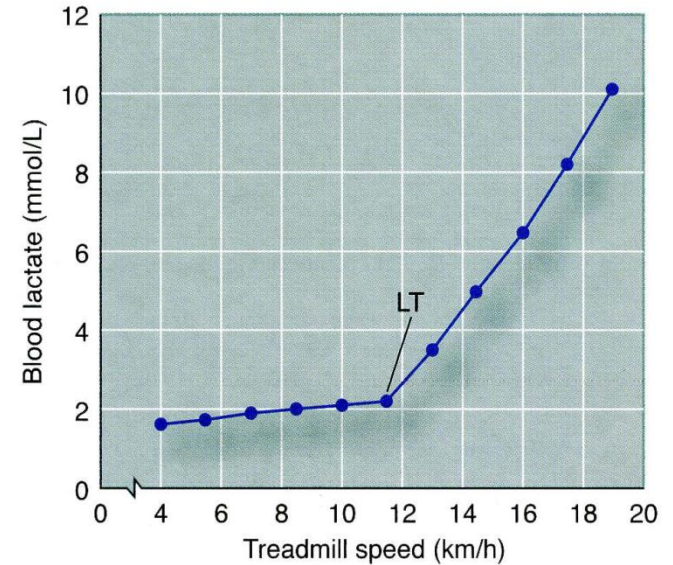


Figure 4.6 The relationship between exercise intensity (running velocity) and blood lactate concentration. Blood samples were taken from a runner's arm vein and analyzed for lactate after the subject ran at each speed for 5 min. LT = lactate threshold.

• Metabolisme muscular

Energia a curt termini: sistema de l'àcid làctic

Umbral de lactat \approx umbral anaeròbic

Factors que afecten l'umbral de lactat (LT):

- **Composició miotipològica:** percentatge de fibres tipo I vs tipo II: las **fibres ràpides** presenten major activitat **LDH**. El reclutament de las fibres ràpides afavoreix l'acumulació de **lactat**.
- **Distribució** de la carga de treball (massa muscular implicada).
- Capacitada **hepàtica** per a reutilitzar el lactat o.
- **Entrenament**.

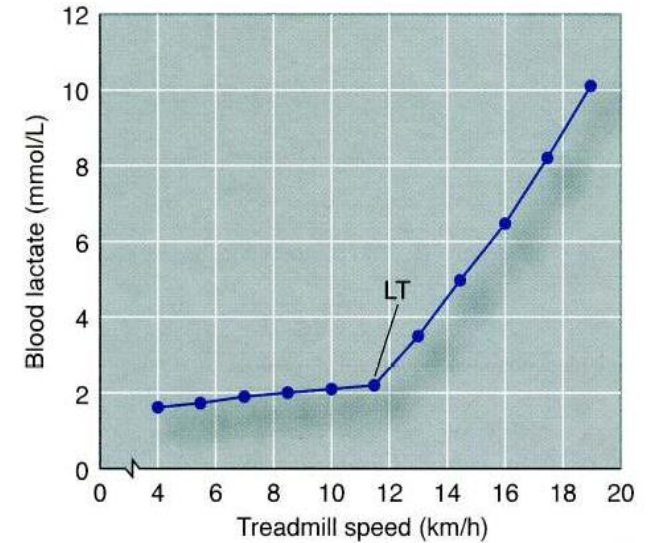
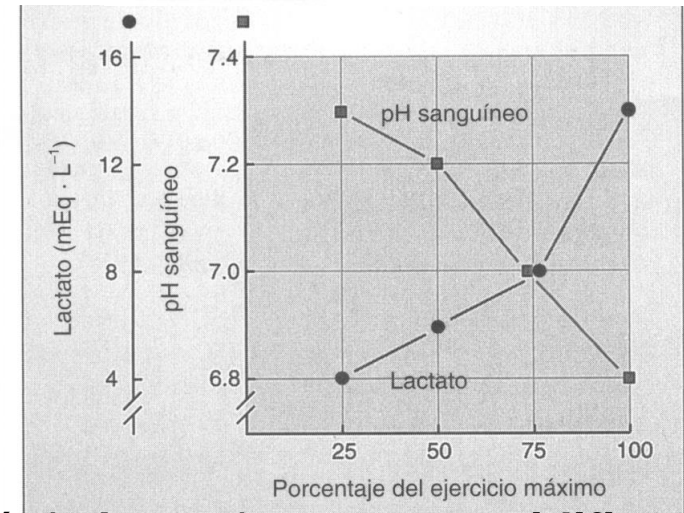


Figure 4.6 The relationship between exercise intensity (running velocity) and blood lactate concentration. Blood samples were taken from a runner's arm vein and analyzed for lactate after the subject ran at each speed for 5 min. LT = lactate threshold.



El **metabolisme anaeròbic** comporta la producció de **lactat** i, per tant, **acidificació** del medi.

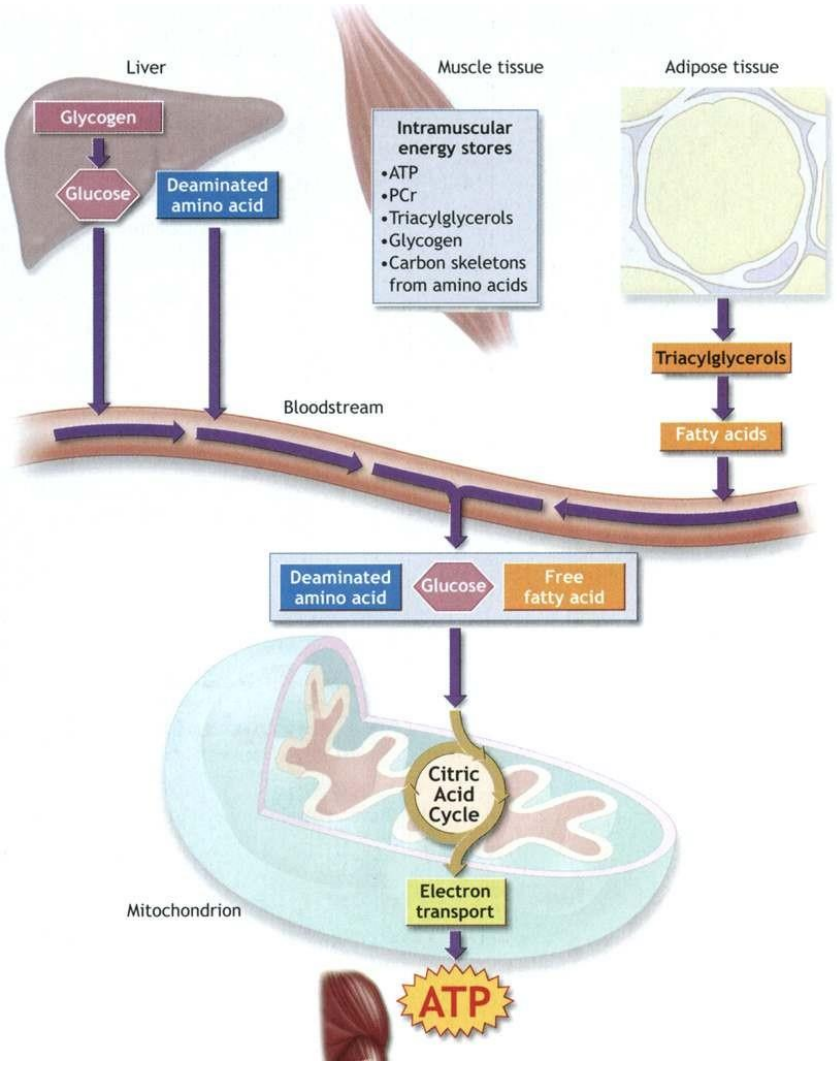
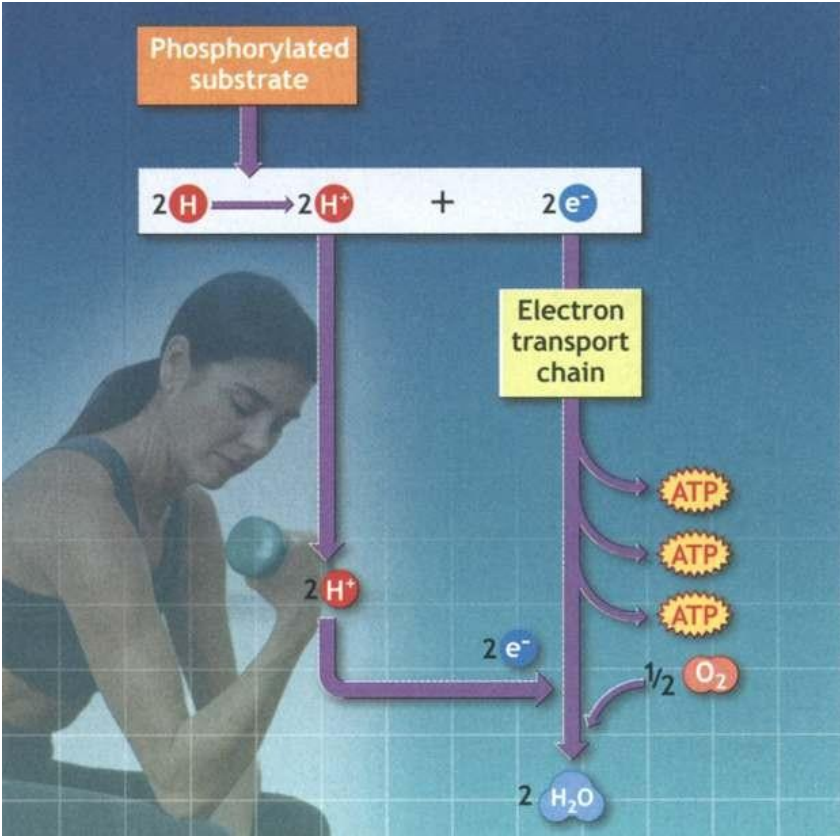
• **Metabolisme muscular**

3) Respiració aeròbica

📖 El **metabolisme aeròbic** permet la utilització de glucosa, greixos i proteïnes.

📖 Comporta l'aport d'oxigen al múscul.

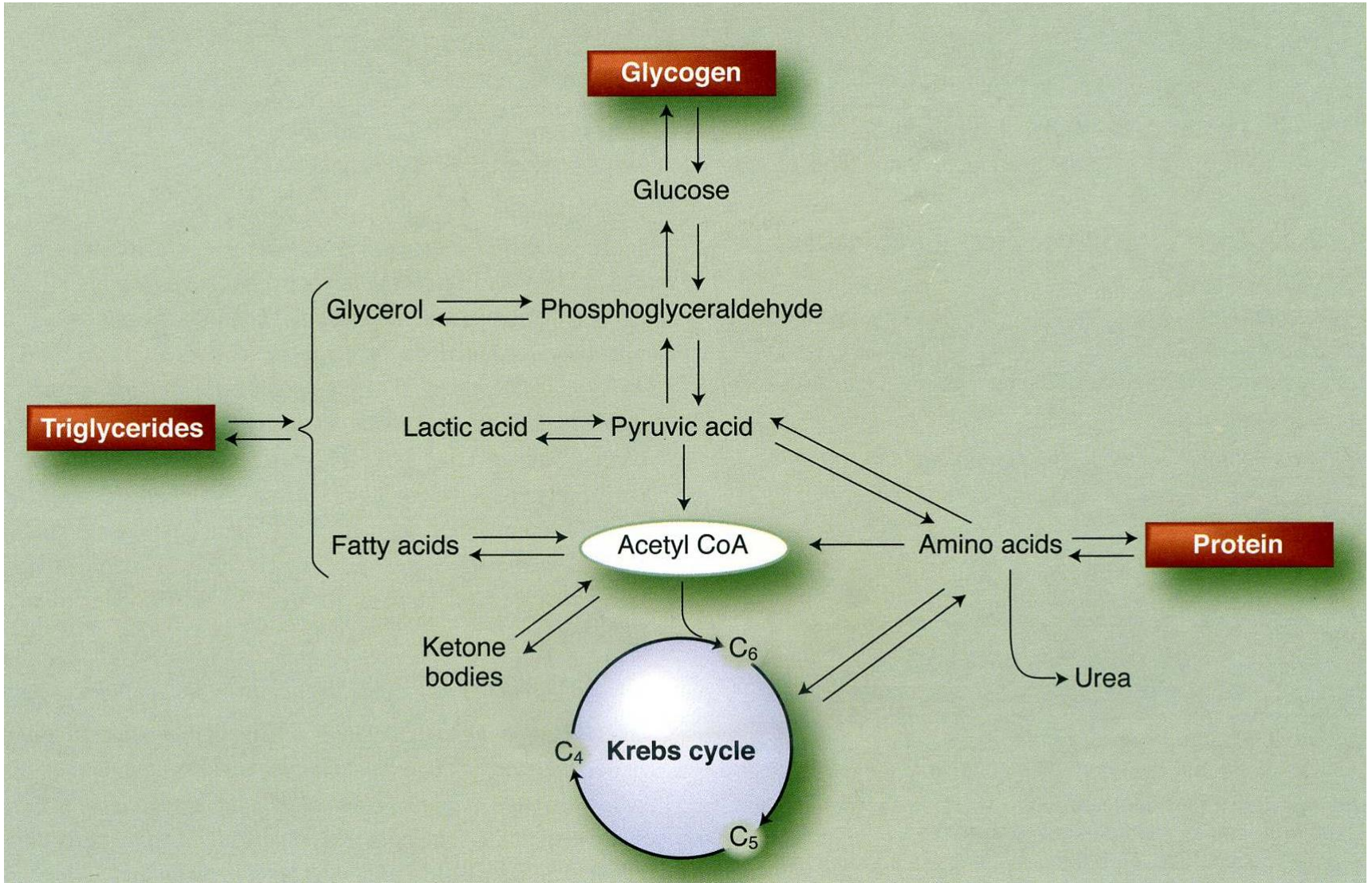
📖 És més **lent** però molt més **rentable**.



- **Metabolisme muscular**

- 3) **Respiració aeròbica**

- La **intensitat** de l'exercici determinarà quin **substrat** alimenta esta via metabòlica

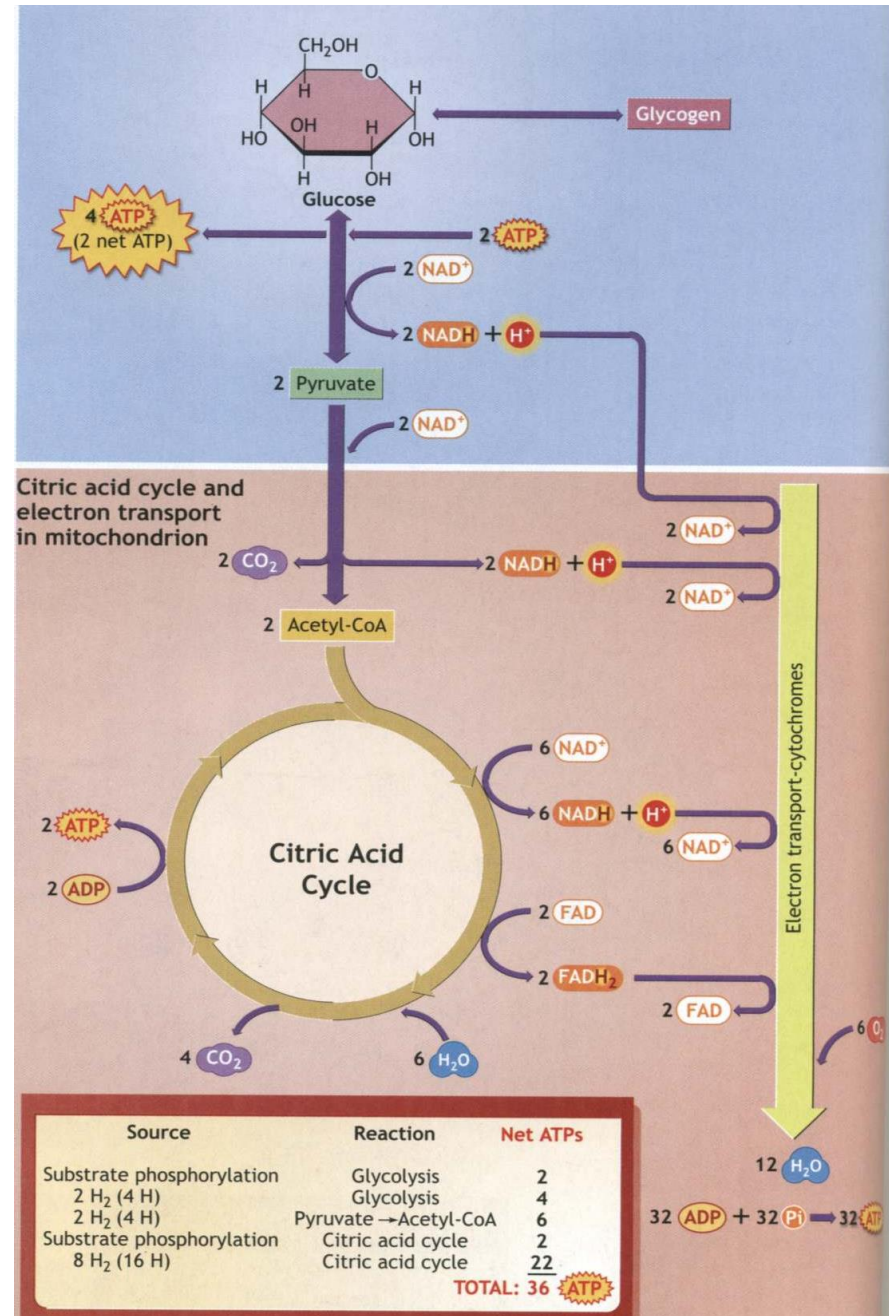


• Metabolisme muscular

3) Respiració aeròbica

La **fosforilació oxidativa** de la **glucosa** permet l'obtenció de **36 molècules de ATP per cada molècula de glucosa**, front a las 2 molècules de ATP (netes) obtingudes pel metabolisme anaeròbic.

Permet la utilització no sols de las **reserves** de glucogen muscular sino, també, de l'**aport** de glucosa **hepàtica** i de la **dieta**.



• Metabolisme muscular

3) Respiració aeròbica

Fosforilació per que ADP es fosforila ($ADP + P_i = ATP$).

Oxidativa: El transport d'electrons és un procés oxidatiu (=de pèrdua d'electrons).

Els complexos enzimàtics de la membrana interna mitocondrial capten electrons de $FADH_2$ i $NADH$ i els transporten (“**cadena de transport d'electrons mitocondrial**”)

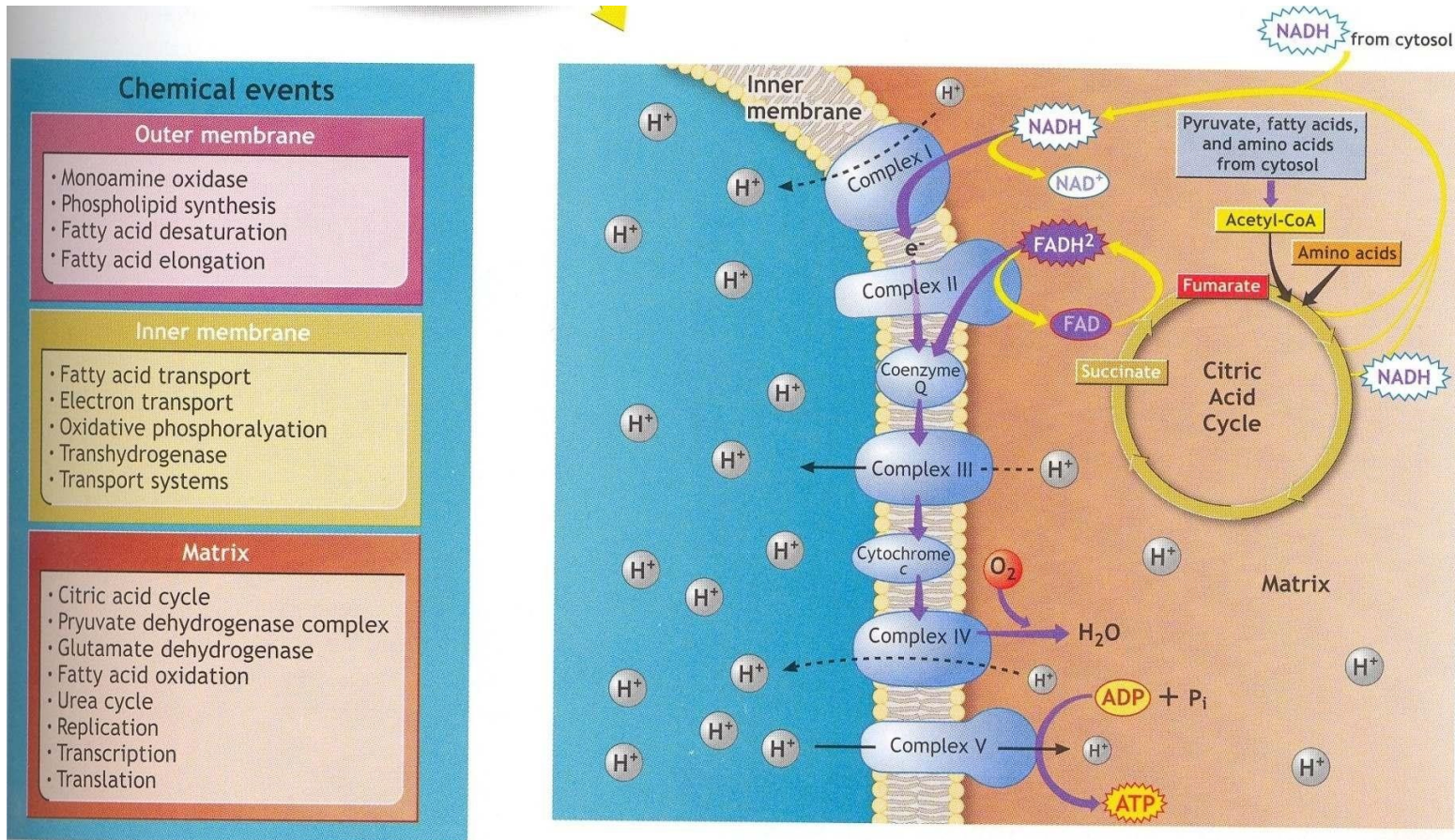


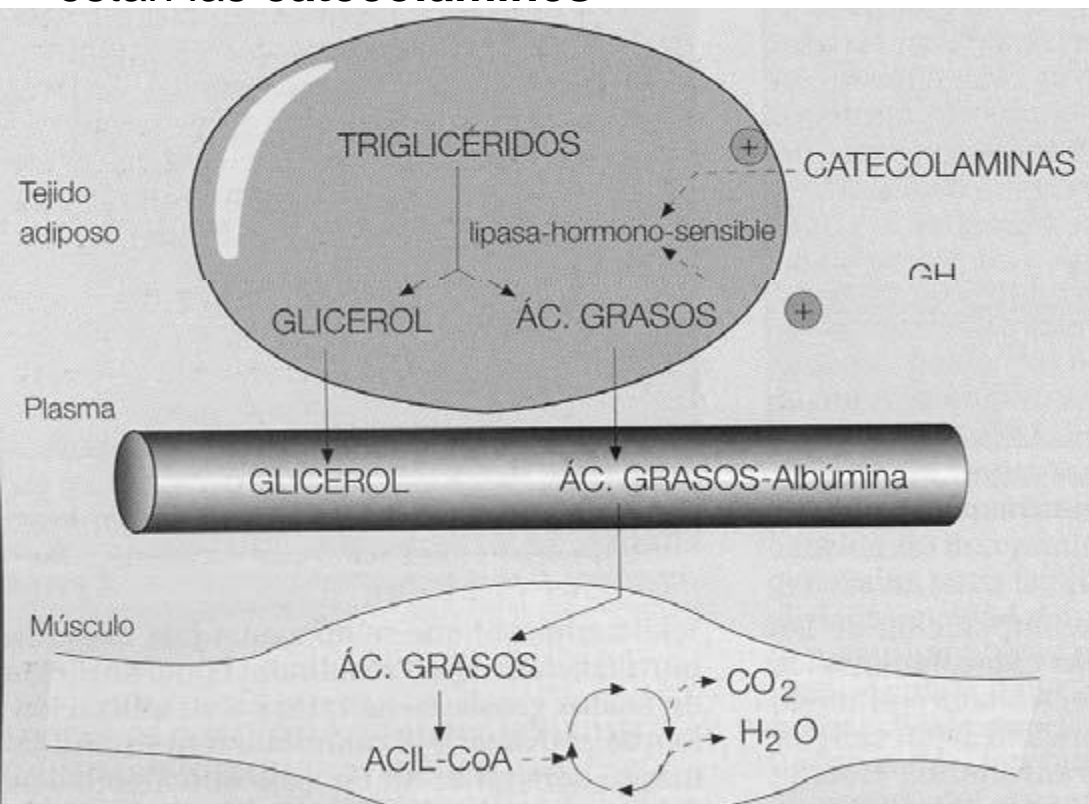
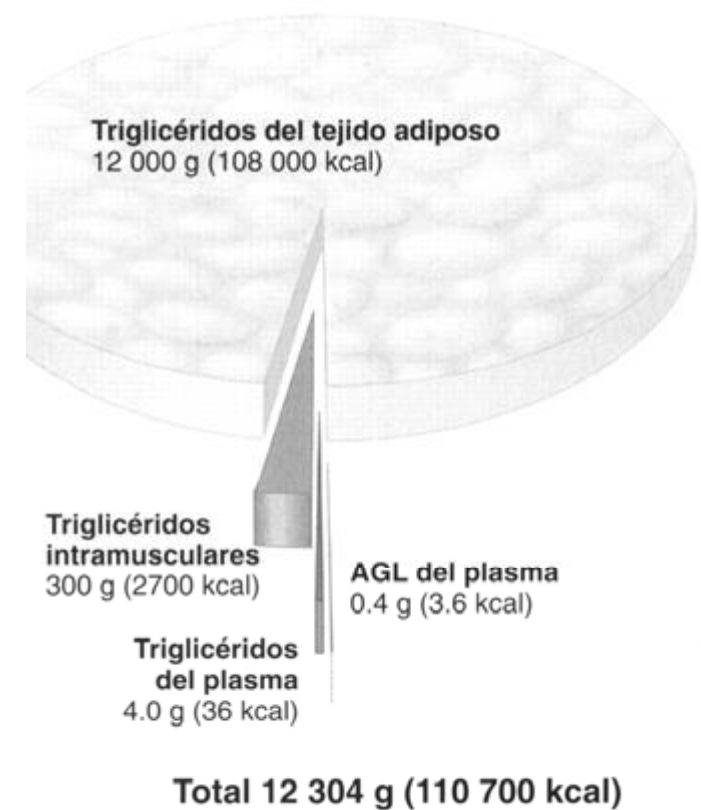
FIGURE 5.10 • The mitochondrion, its intramitochondrial structures, and primary chemical reactions. The inset table summarizes the different chemical events in relation to mitochondrial structures.

Metabolisme muscular

3) Respiració aeròbica

Metabolisme dels lípids en la fibra muscular

- El múscul esquelètic posseeix una **reserva de greixos utilitzable com** substrat energètic.
- **Lipòlisis: degradació dels TG en Glicerol y AG (por les lipases).**
- L'exercici activa la **mobilització de la reserva de greixos adiposa. Entre** les hormones implicades estan las **catecolamines**



Metabolisme muscular

3) Respiració aeròbica

Metabolisme dels lípids en la fibra muscular: β -oxidació dels AG.

- El catabolisme dels AG es denomina **beta-oxidació**. Té lloc a l'interior de la mitocòndria.
- La **captació de AG de cadena llarga per la mitocòndria depen de la presència de L-carnitina**.

Es sintetitzada pel fetge i els ronyons. El 95% es troba al múscul. Abunda en carn i làctics.

- S'ha postulat que un augment en el contingut de carnitina pot facilitar l'oxidació dels AG, millorant el metabolisme oxidatiu la capacitat aeròbica.

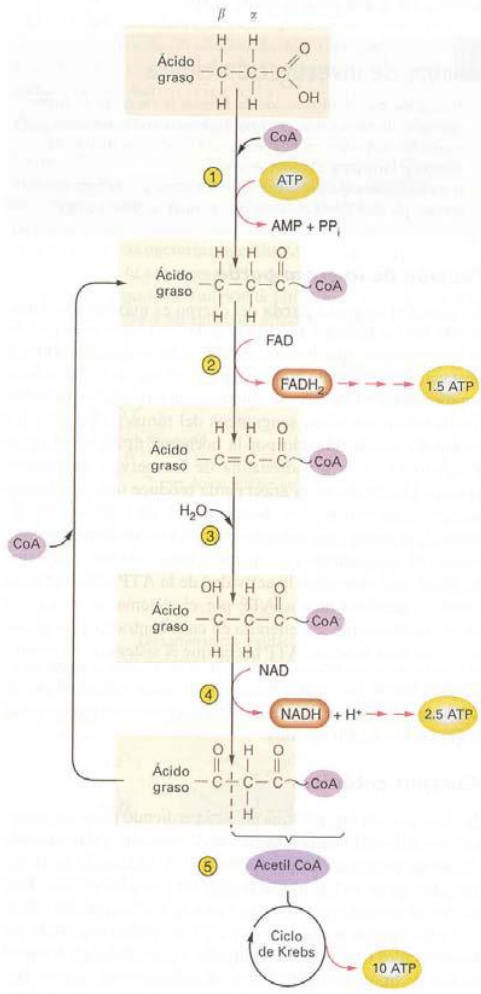
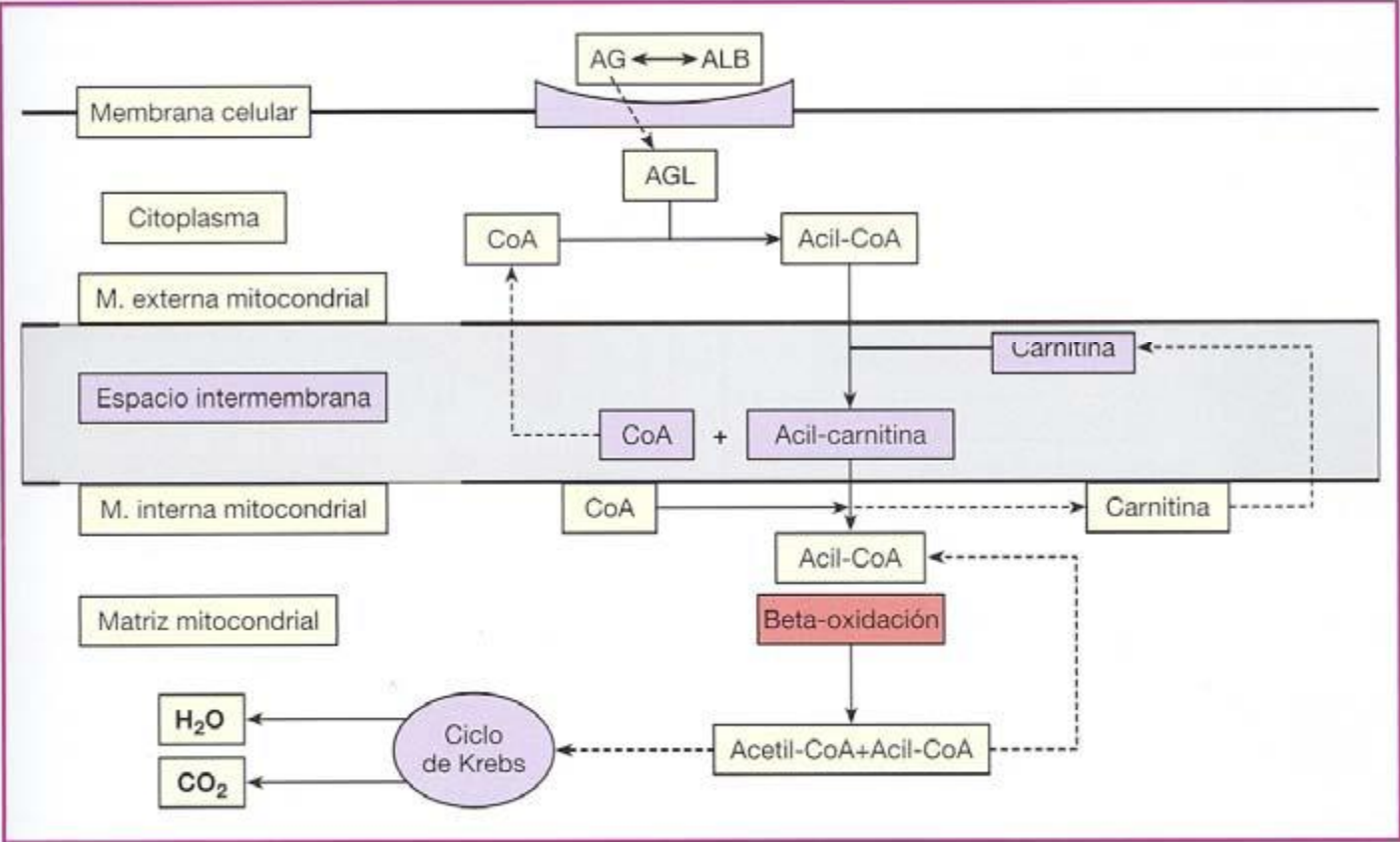


Figura 10.24. Utilització de los ácidos grasos por la célula muscular. Papel de la carnitina en el metabolismo lipídico.

Metabolisme muscular

3) Respiració aeròbica

Metabolisme dels lípids en la fibra muscular

L-carnitina : el “no va més” en cremagreixos, ¿funciona?

Carnitina

Los ácidos grasos de cadena larga son la principal fuente de energía del cuerpo, y la oxidación de los ácidos grasos aporta energía en reposo y durante el ejercicio. La **carnitina** es importante en el metabolismo de los ácidos grasos porque ayuda a la transferencia de ácidos grasos del citosol (la porción líquida del citoplasma, exclusiva de las organelas) sobre la membrana mitocondrial interna para la betaoxidación. Esta membrana suele ser impermeable a los ácidos grasos de cadena larga, por ello la disponibilidad de carnitina tal vez sea un factor limitador para la tasa de oxidación de ácidos grasos.

Se ha postulado la teoría de que al aumentar la disponibilidad de carnitina se pueda facilitar la oxidación de lípidos. Al depender más de las grasas como fuente de energía, es posible ahorrar glucógeno y aumentar la capacidad de resistencia aeróbica. Los estudios sobre la carnitina son mixtos: varios muestran pruebas indirectas del aumento de la oxidación de grasas con la suplementación de carnitina, si bien la mayoría no muestra efecto alguno directo o indirecto. Los estudios han demostrado que la suplementación con carnitina no mejora el almacenamiento de carnitina en los músculos, ni la oxidación de ácidos grasos, no ahorra glucógeno, ni pospone la aparición de la fatiga durante el ejercicio, ni tampoco ha demostrado de forma inequívoca que mejore el rendimiento de los deportistas.³⁵

Metabolisme muscular

3) Respiració aeròbica

Metabolisme dels lípids en la fibra muscular

Aunque las grasas proporcionan más kcal de energía por gramo que los hidratos de carbono, la oxidación de las grasas requiere más oxígeno que la de los hidratos de carbono. La producción de energía a partir de las grasas es de 5,6 moléculas de ATP por molécula de oxígeno usada, en comparación con la producción por parte de los hidratos de carbono de 6,3 moléculas de ATP por molécula de oxígeno. El aporte de oxígeno se ve limitado por el sistema de transporte del oxígeno, por lo que los hidratos de carbono son el combustible preferido durante la realización de ejercicios de elevada intensidad. Además, el ritmo máximo de formación de fosfatos hiperenergéticos a partir de la oxidación de lípidos es demasiado lento

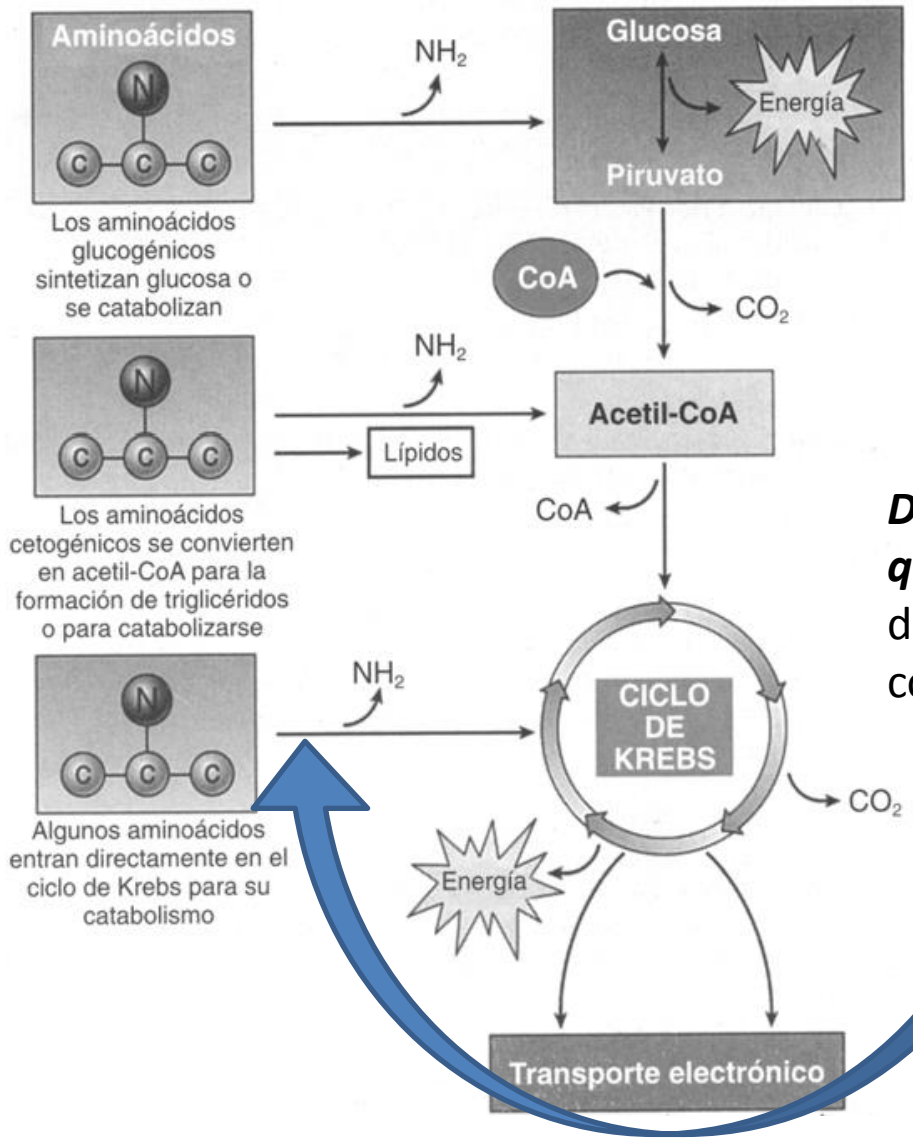
para ajustarse al ritmo de utilización de fosfatos hiperenergéticos durante un ejercicio de mayor intensidad. Esto explica la reducción del ritmo en carrera de un deportista cuando las reservas de hidratos de carbono están agotadas y la grasa, por defecto, se convierte en la fuente predominante de energía.

La velocitat de alliberació d'energia dels hidrats de carboni és quatre vegades major que la de els greixos.

Metabolisme muscular

3) Respiració aeròbica

Metabolisme dels aminoàcids

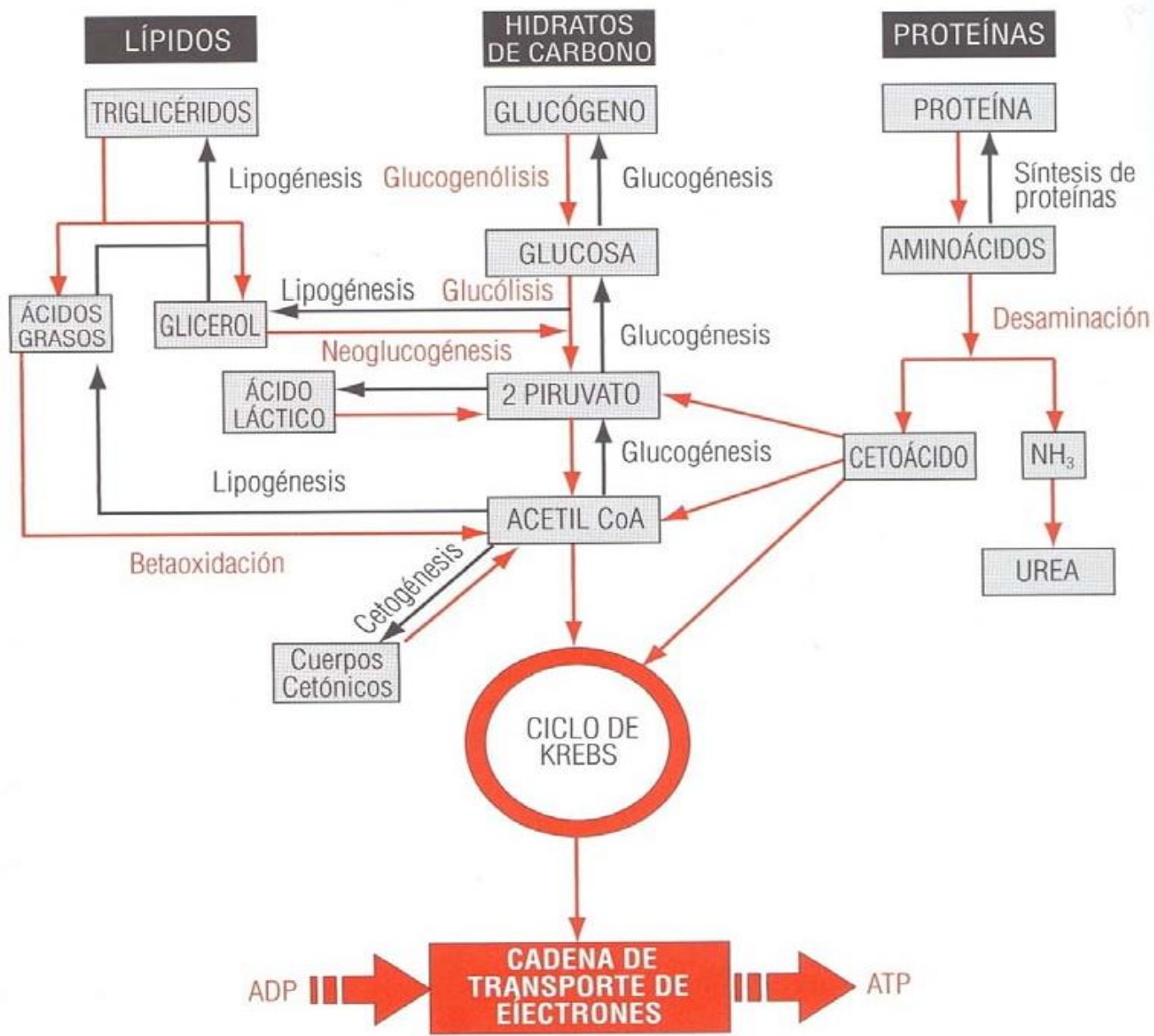


- La proteïna pot resultar una font d'energia (3-10%), una vegada esgotada la reserva de glucògen muscular i hepàtica.
- Poden generar glucosa (glucogènics) o acetil-CoA (cetogènics), o ingressar directament en el cicle de Krebs.

Desaminació oxidativa és la ruta metabòlica que elimina grups amino dels aminoàcids, deixant un cetoàcid i amoníac (que es converteixen en urea en el fetge)

Metabolisme muscular

Resum de totes les vies metabòliques

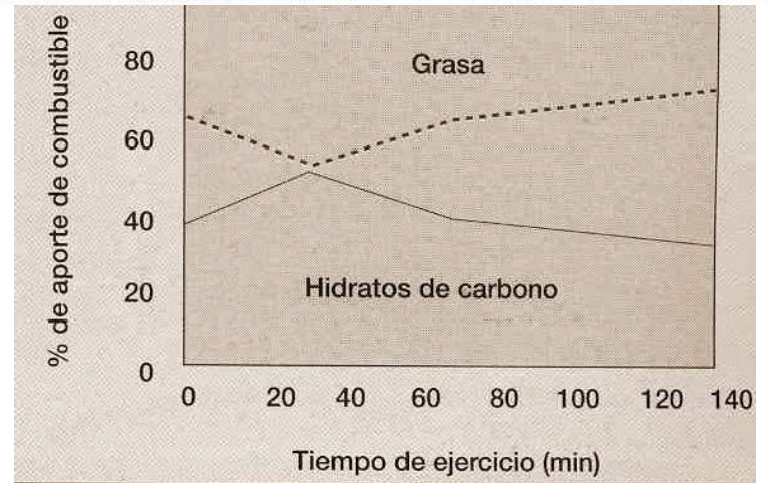
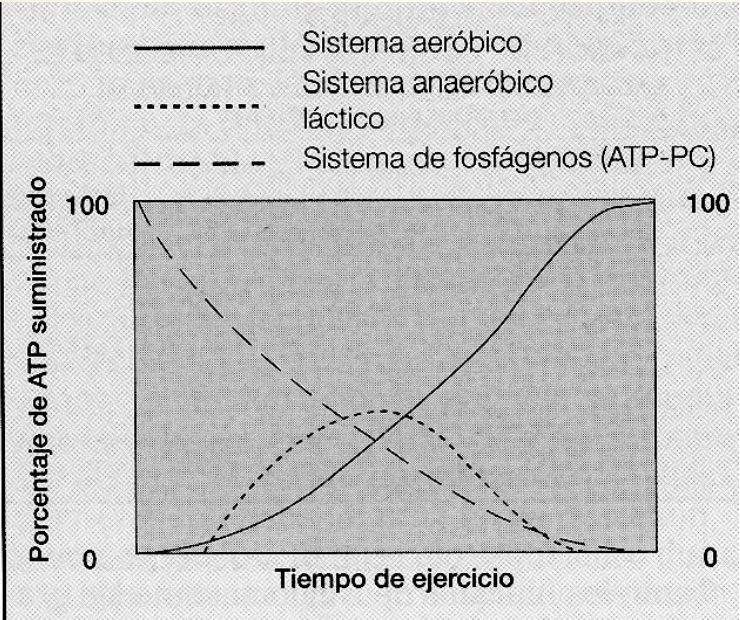
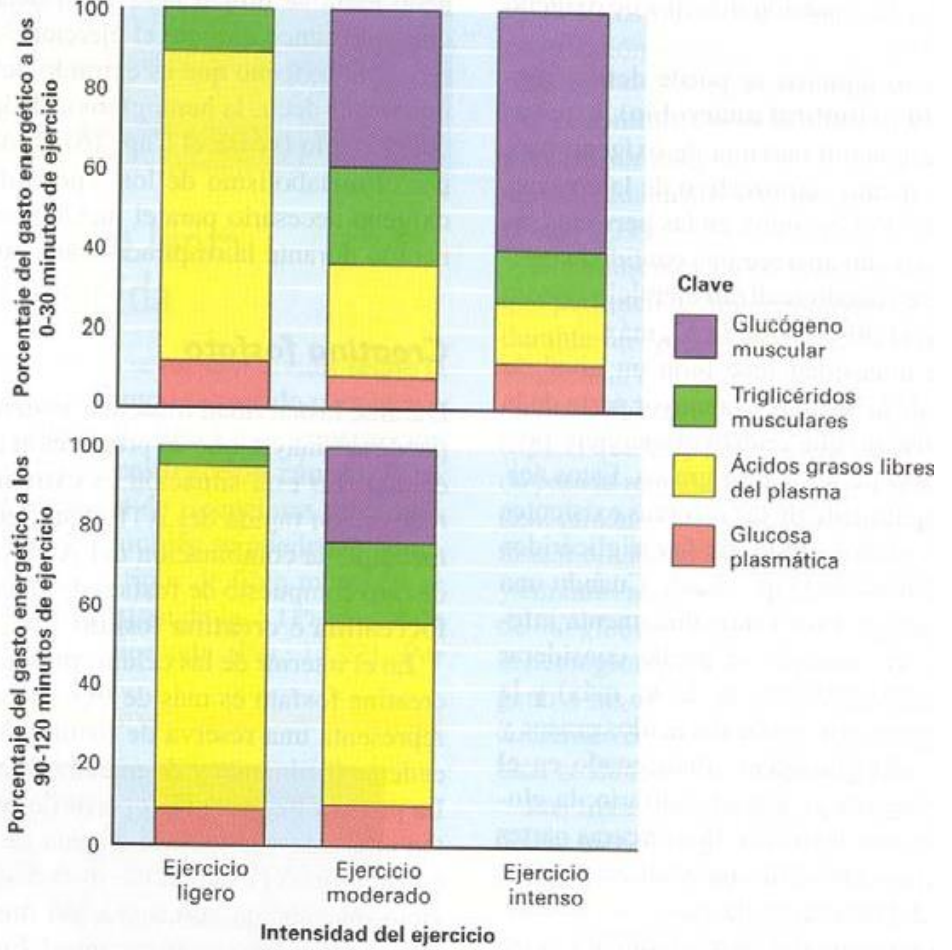


Metabolismo muscular

Balanc energètic

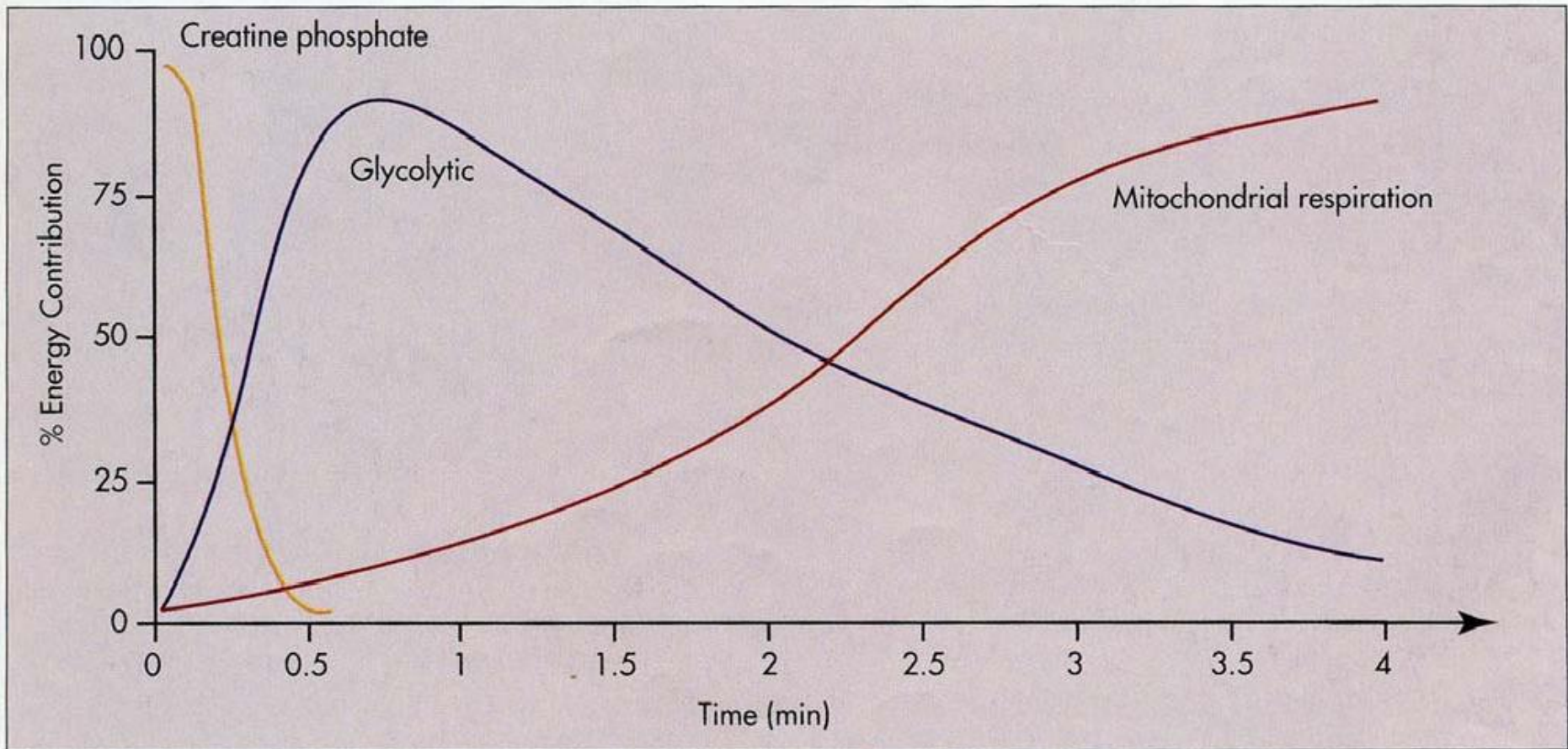
Cuadro 5.4. Importancia relativa de diferentes moléculas de la sangre con respecto a las necesidades energéticas de los distintos órganos

Órgano	Glucosa	Ácidos grasos	Cuerpos cetónicos	Ácido láctico
Cerebro	+++	-	+	-
Músculos esqueléticos (en reposo)	+	+++	+	-
Hígado	+	+++	++	+
Corazón	+	++	+	+



Metabolisme muscular

Relació entre la **duració de l'exercici exhaustiu** i la **contribució dels diferents sistemes d'obtenció d'energia**



Metabolisme muscular

La intensitat i la durada de l'exercici determinen la combinació de fonts energètiques utilitzades

Sistema **anaeròbic**: predomina en l'exercici d'**elevada intensitat i curta durada** (sistema de **fosfàgens** y **glucòlisis anaeròbica**).

Sistema **aeròbic**: predomina en l'exercici de **baixa intensitat i llarga durada** (els **greixos** són el combustible principal).

- El **glucogen muscular** s'utilitza al començament de l'exercici i a l'augmentar la intensitat.
- Quan augmenta la intensitat, el fetge allibera **glucosa** per al múscul actiu.
- Si s'esgota el glucogen: dependència quasi total de **greixos** per produir ATP.

Ventaja del metabolisme dels hidrats de carboni al augmentar la intensitat: més ràpida (entre 2 i 4 vegades més ràpida) i major poder calòric per unides de O₂ consumit.

Importància de la dieta segons el tipus d'activitat.

Metabolisme muscular

Elecció del substrat en funció de la durada de l'exercici

L'entrenament **aeròbic** afavoreix la utilització dels greixos i "l'estalvi" d'hidrats de carboni, de manera que per una mateixa intensitat relativa, un subjecte entrenat obté un major percentatge de l'aport energètic dels greixos que un individu sedentari.

Els dos factors que condicionen la utilització d'un substrat són: la **disponibilitat** i la **capacitat de les cèl·lules per oxidarles**.

La disponibilitat dels AG supera sempre les necessitats, per tant, l'adaptació es basa en una major capacitat d'utilització dels mateixos per part de la cèl·lula.

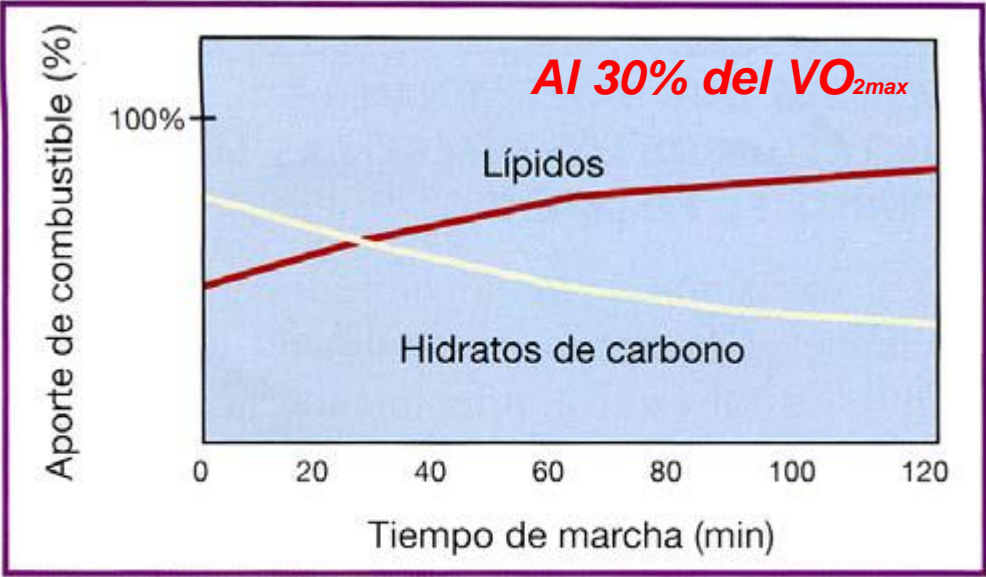


Figura 10.36. En ejercicios de baja intensidad, según aumenta la duración del ejercicio, el protagonismo de las grasas como combustible va siendo cada vez mayor, mientras que los hidratos de carbono van disminuyendo su contribución.

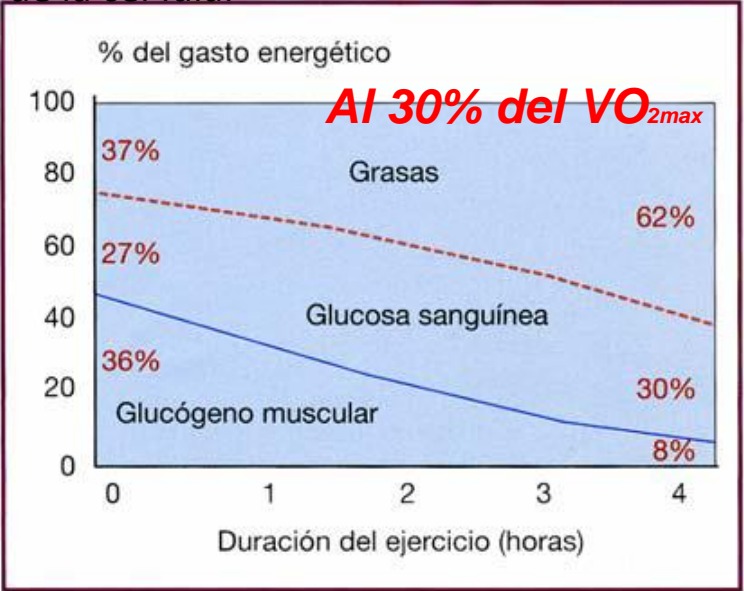


Figura 10.37. Cambios en la contribución relativa de los diferentes sustratos (grasas, glucosa sanguínea y glucógeno muscular) durante un ejercicio de cuatro horas de duración a una intensidad del 30% del VO_{2max} (Modificada de Ahlborg G, Felig P, Hagenfeldt L, Hendler R, Wahren J. Splanchnic and leg metabolism of glucose, free fatty acids and aminoacids. J Clin Invest, 1974; 53:1086.)

La “pajara”

L'esgotament del glucogen hepàtic i muscular produeix **fatiga** (a pesar de disposar d'O₂ i greixos).

El múscul no té l'enzima fosfatasa (cóm en el fetge) que allibera glucosa des de l'interior de les cèl·lules.

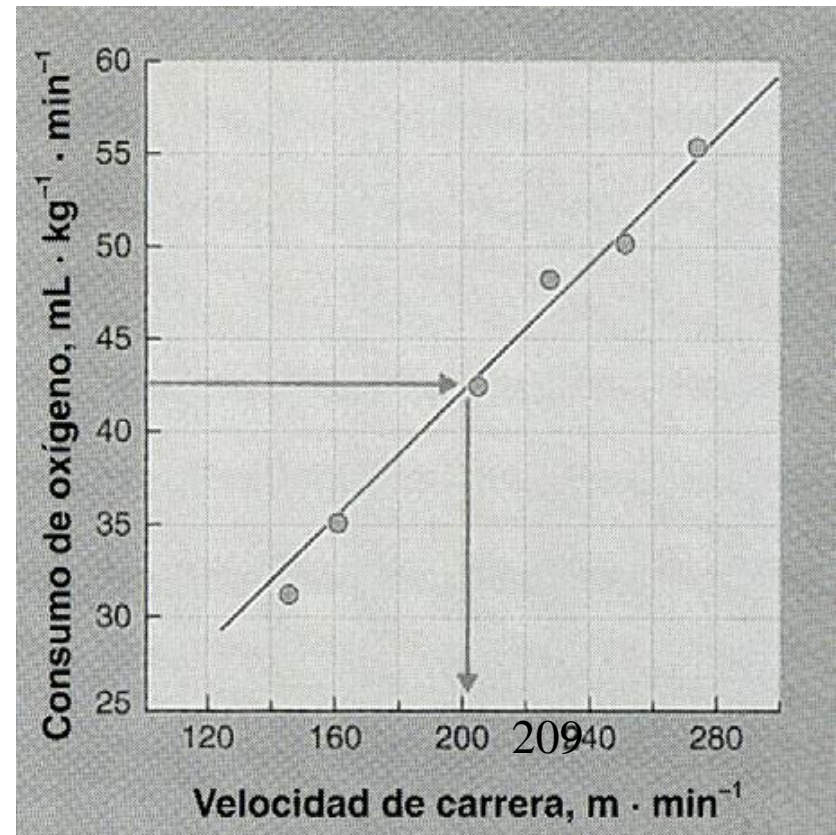
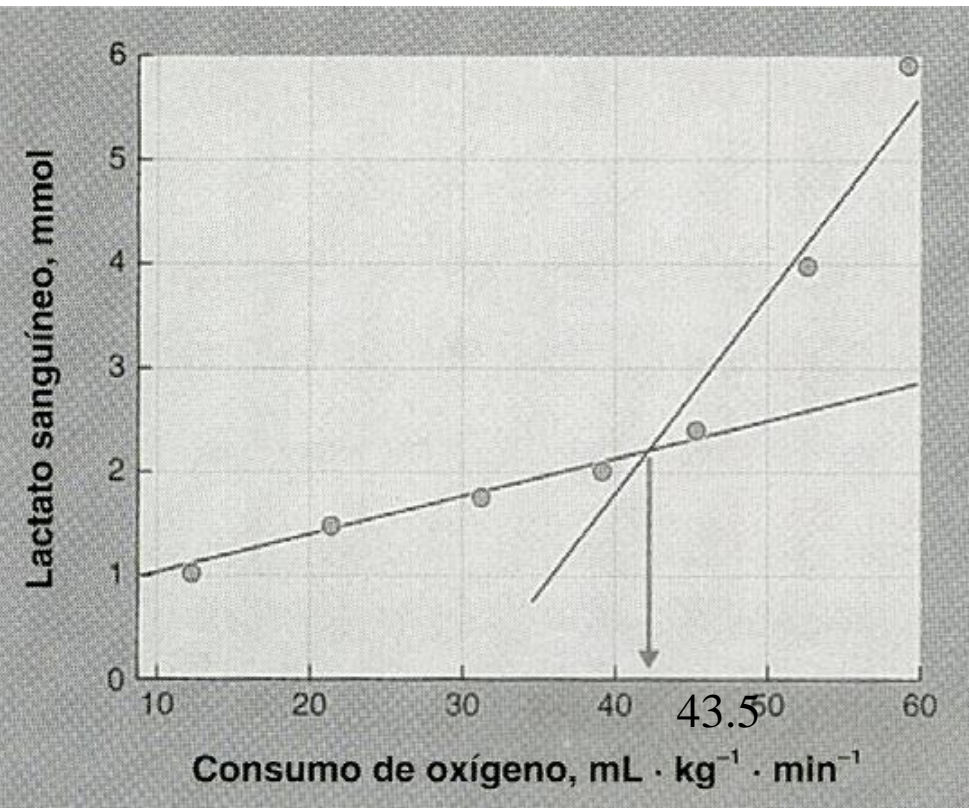
Pàjara: incapacitat per continuar l'exercici.

Possibles causes:

- Utilització de glucosa pel SNC
- Alliberació d'energia dels greixos més lenta.



¿ Com determinar el ritme d'una cursa de 10.000 m a partir de l'umbral de lactat?



Temps calculat = Distància / Velocitat

10000 m / 209 m · min⁻¹

= 47.85 min (47min: 51 s)