

# Regolazione della temperatura corporea

FGE aa.2016-17

# ARGOMENTI

Bilancio del calore del corpo

Meccanismi di termogenesi e termolisi

Risposte fisiologiche al caldo e al freddo

Termoregolazione nel lavoro muscolare

Equilibrio idrico e attività fisica

Acclimatazione al caldo e al freddo

# Introduzione

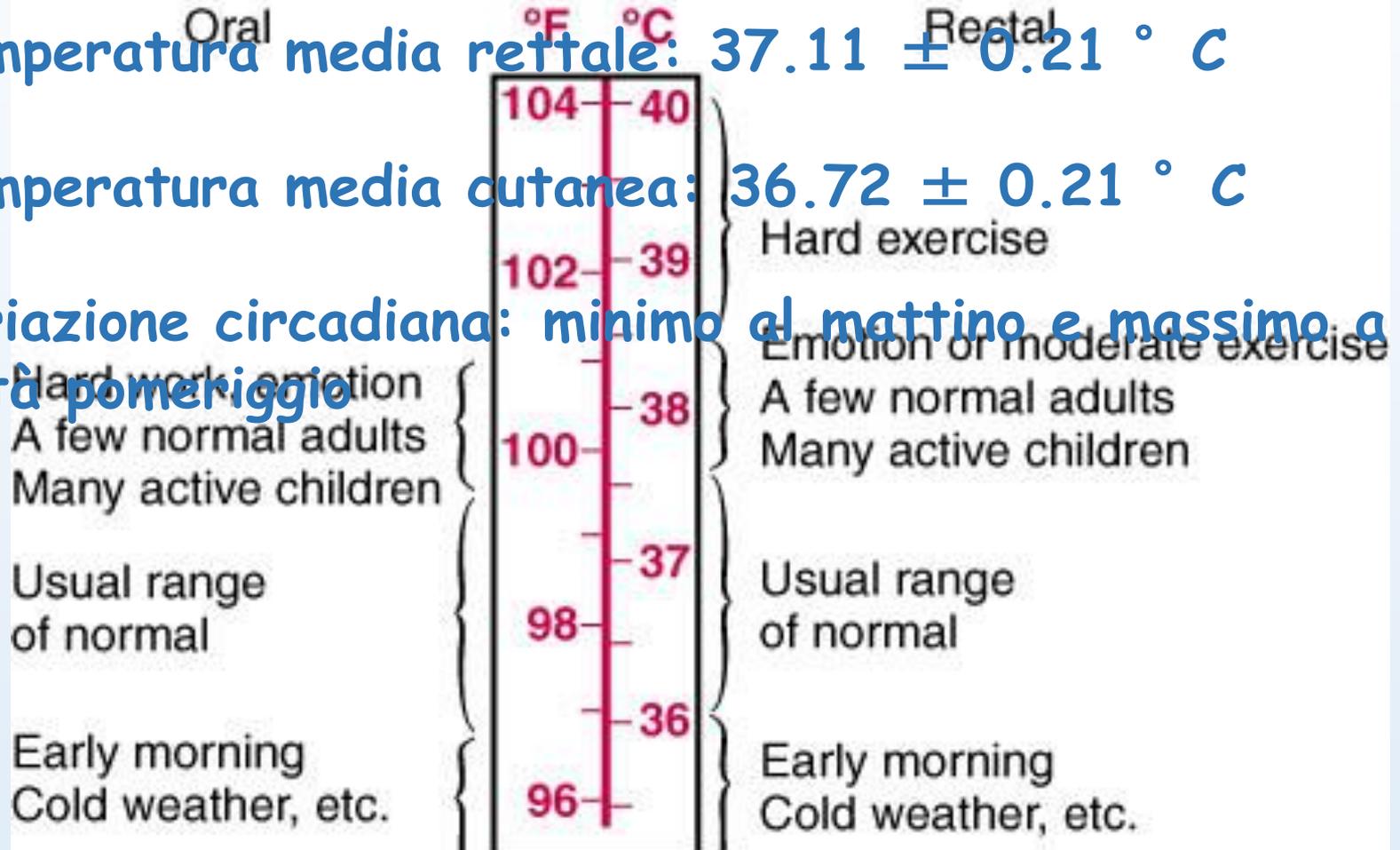
- **Animali poichilotermi:** la temperatura interna fluttua a seconda della temperatura ambiente
- **Animali omeotermi (a sangue caldo):** produzione e dispersione del calore sono regolate in modo da mantenere la temperatura interna entro limiti ristretti malgrado le condizioni ambientali varino entro un vasto ambito.

## Temperatura normale dell' organismo

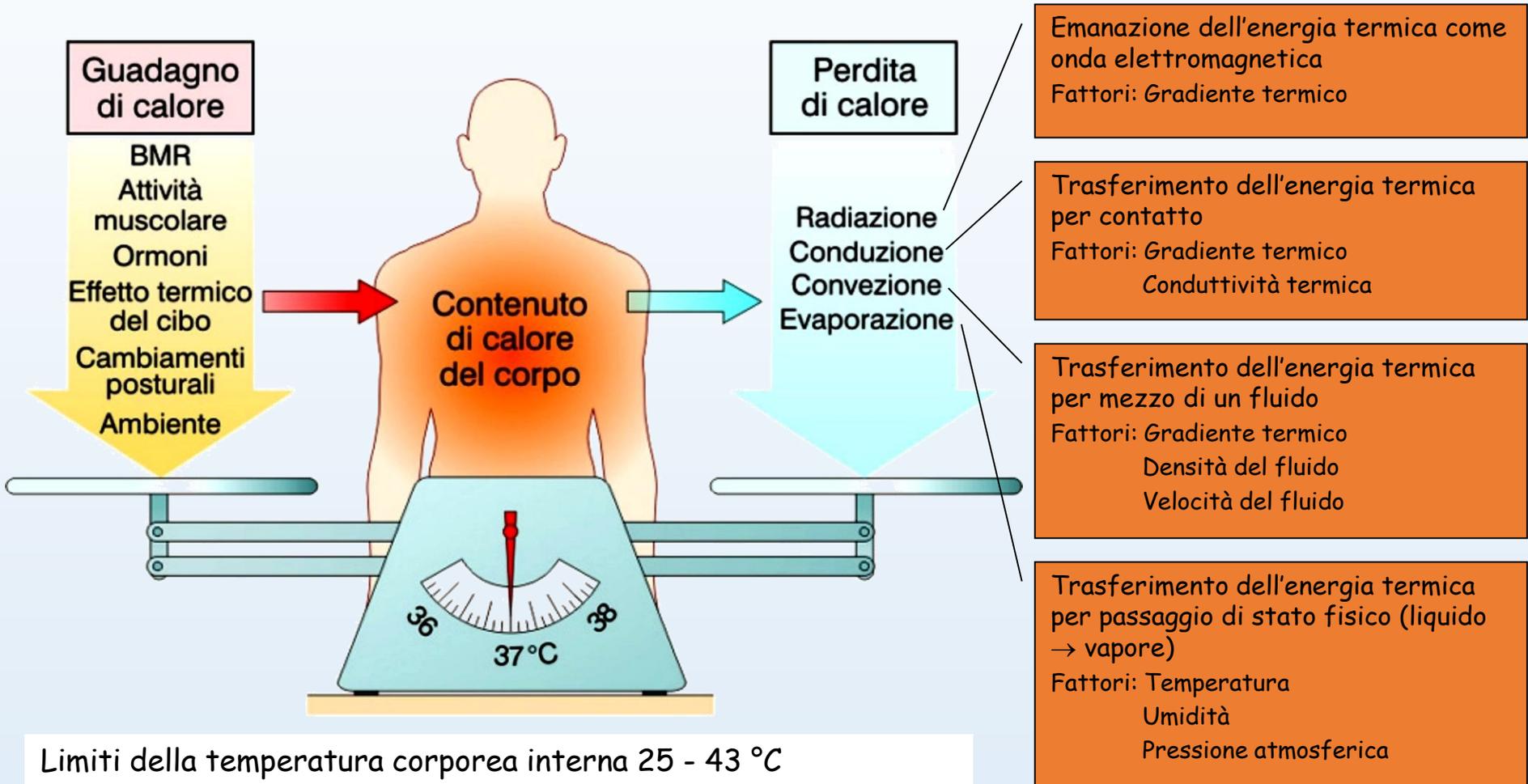
Oral Rectal  
Temperatura media rettale:  $37.11 \pm 0.21 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura media cutanea:  $36.72 \pm 0.21 \text{ } ^\circ\text{C}$

Variazione circadiana: minimo al mattino e massimo a metà pomeriggio

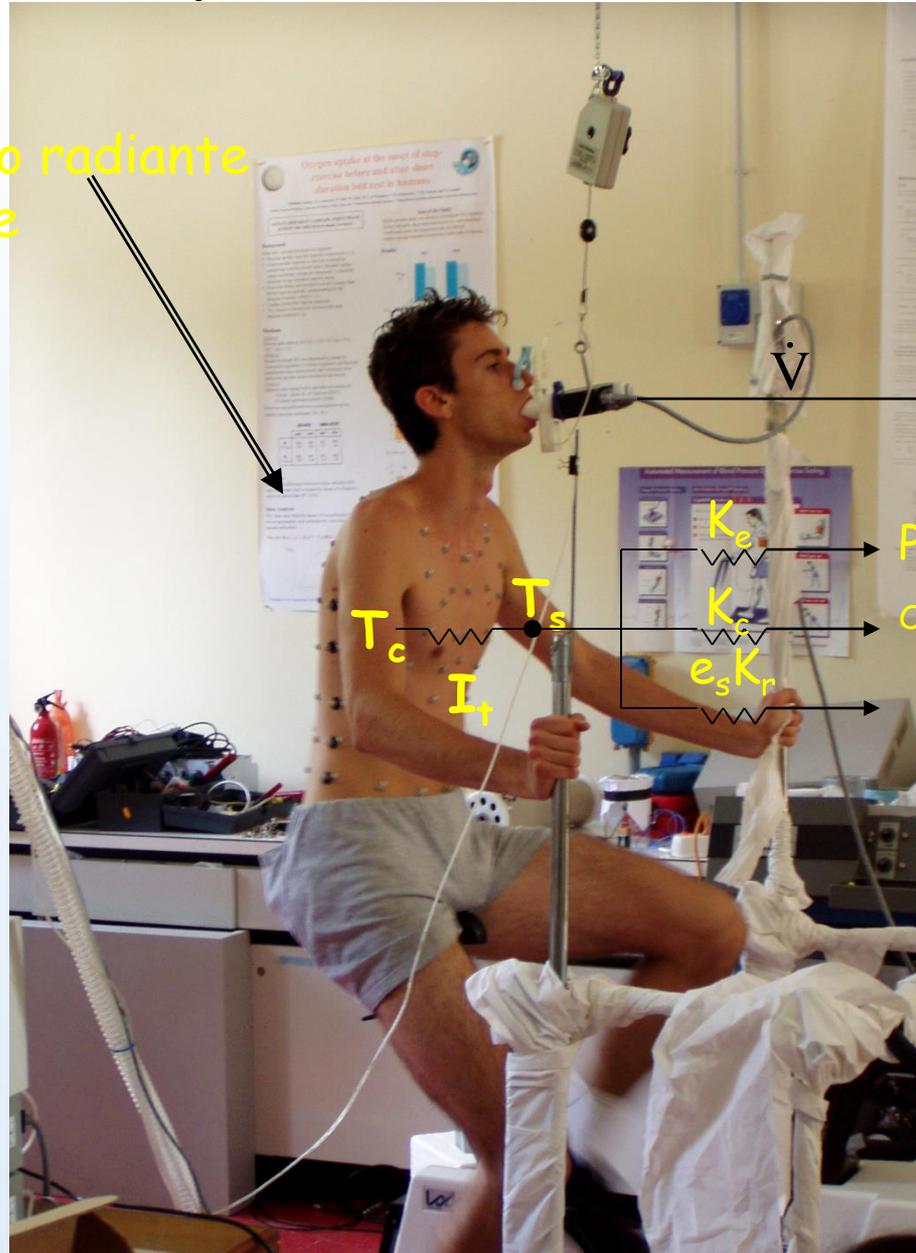


# Bilancio del calore



# Scambio di Calore con l'Ambiente

Flusso radiante  
solare



} Evaporazione

$P_{H_2}$   
 $T_a$  Convezione

$T_r$  Irradiazione

# Scambio di Calore con l' Ambiente

- Il flusso di calore per unità di area esposta attraverso ciascuna via dipende:
  - dal prodotto della differenza di temperatura (o  $P_{H_2O}$ ) per le relative conduttanze ( $e_s K_r, K_e, K_c$ )

Il calore totale trasportato dalla superficie è la somma dei flussi di calore attraverso le tre vie per le superfici esposte meno un flusso di calore incidente da irradiazione solare

# Convezione

- Passaggio di calore ad un fluido in movimento
- *Naturale o forzata*
- Fattori che determinano la Convezione.
  1. **Gradiente di temperatura** tra superficie corporea e aria ambiente:  $(T_s - T_a)$
  2. **Superficie corporea esposta:**  $A_c$

# Convezione

## 3. Coefficiente di convezione $K_c$ (kcal/m<sup>2</sup> hr °C)

Tiene conto della velocità con cui le correnti di convezione portano aria alle superficie del corpo per partecipare allo scambio di calore;

dipende da densità, viscosità, velocità dell'aria libera e forma della superficie

**Calore netto perso:**

$$H'_c = K_c A_c (T_s - T_a)$$

Il prodotto  $K_c A_c$  ha le dimensioni di una conduttanza termica ( $\theta_c$ )

# Esempi

- Individuo nudo a riposo:

$$T_a = 29 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$K_c = 6 \text{ kcal/m}_2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$T_s \approx 33 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$A_c = 1.5 \text{ m}^2 \text{ (} A_c < SC \text{)}$$

$$M_b = 85 \text{ Kcal per m}^2 \text{ all' ora}$$

$$H'_c = 36 \text{ Kcal per m}^2 \text{ all' ora}$$

42.5 % del calore totale è perso per convezione

- Individuo vestito a riposo:

$$T_a = 29 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$K_c = 6 \text{ kcal/m}_2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$$

$$T_s \approx 30.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$A_c = 1.5 \text{ m}^2 \text{ (} A_c < SC \text{)}$$

$$M_b = 85 \text{ Kcal per m}^2 \text{ all' ora}$$

$$H'_c = 13.5 \text{ Kcal per m}^2 \text{ all' ora}$$

16 % del calore totale è perso per convezione

# Irradiazione

- La superficie del corpo emette energia elettromagnetica in quanti discreti chiamati fotoni che viaggiano alla velocità della luce fino a quando non siano assorbiti in corrispondenza di una superficie.
- L'energia media ed il numero di fotoni emesso nell'unità di tempo aumentano quando aumenta la temperatura della superficie.
- Anche gli oggetti densi presenti nell'ambiente emettono fotoni.
- **Irradiazione: scambio di energia tra il corpo e il suo ambiente radiante**

# Irradiazione

- Quantità di energia radiante scambiata nell'unità di tempo  $H'_r$ :

$$H'_r = K_r A_r e_s (T_s - T_r)$$

- $K_r$ : coefficiente di irradiazione ( $\approx 7.0 \text{ Kcal-h/ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- $A_r$ : superficie effettiva
- $T_r$ : temperatura radiante ambientale - temperatura di quegli oggetti dell'ambiente con i quali avviene lo scambio di energia radiante.
- $T_s$ : temperatura cutanea
- $e_s$ : capacità di emissione della SC; frazione di energia incidente che viene assorbita (corpo umano: 0.98)

# Irradiazione

- In un ambiente comune l'irradiazione è responsabile di molta parte dello scambio di energia

## Esempio

$$T_a = 29 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$K_c = 6 \text{ kcal/m}_2 \text{ hr }^\circ\text{C}$$

$$T_s \approx 30.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$A_c = 1.5 \text{ m}^2 \text{ (} A_c < S_C \text{)}$$

$$M_b = 85 \text{ Kcl per m}^2 \text{ all' ora}$$

$$H'_r = 42 \text{ Kcal per h}$$

49 % dello scambio di calore all'equilibrio

# Conduzione

- Avviene al punto di contatto tra due corpi a diversa temperatura

$$H'_k = K_k A_k (T_s - T_a) = \theta_k (T_s - T_a)$$

- $T_s$  e  $T_a$  sono la temperatura della cute e del corpo in contatto con la cute;
- $A_k$ : area di contatto
- $K_k$ : costante di proporzionalità che dipende dal coefficiente di conducibilità termica e dallo spessore del corpo a contatto con la cute
- $\theta_k$ : conduttanza termica conduttiva

# Evaporazione

- Energia necessaria per far passare l'acqua dallo stato liquido a vapore a temperatura costante: **calore latente** di vaporizzazione. L'evaporazione di 1 L di acqua sottrae una grande quantità di calore

**580 Kcal per litro (0.58 Kcal per gr, acqua distillata a 37°)**

1. Diffusione passiva attraverso la cute
2. Aria espirata (9 Kcal per ora a riposo)  
In ambiente termicamente neutro o fresco, queste due vie rappresentano circa il 15% della perdita totale di calore
3. Effettore termoregolatore attivo:  
- se ambiente caldo, diventa il fattore determinante nello scambio **unidirezionale** (solo perdita) di calore

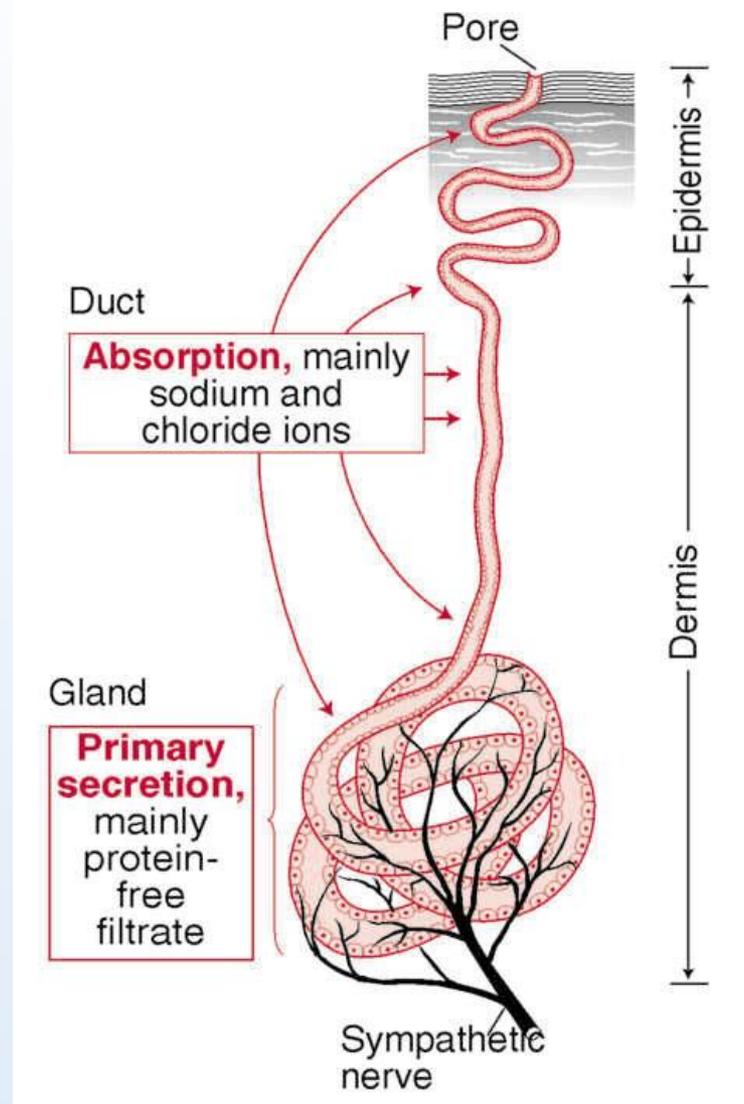
# Evaporazione

4. La secrezione attiva di acqua da parte delle ghiandole sudoripare **eccrine** (inn.e **colinergica**) aumenta la quantità di acqua disponibile per l' evaporazione - sino > 1 litro per ora
5. Se l' aria è **secca**, la perdita di calore per evaporazione ( $H'_e$ ) è **limitata** soltanto dalla **quantità di secrezione di sudore**:

$$H'_e \text{ (Kcal/hr)} = 580 R_{H_2O}$$

( $R_{H_2O}$ : entità della secrezione nell' unità di tempo in litri / ora)

# Ghiandole eccrine



# Evaporazione

6. Se aria umida e stagnante:

$$H'_e = K_e A_w (P_{sH_2O} - P_{aH_2O})$$

$$(H'_{emax} = (P_{sH_2O} - P_{aH_2O}) v^{0.5} 110/A_w)$$

-  $P_{sH_2O}$  e  $P_{aH_2O}$  sono le pressioni parziali dell'acqua sulla superficie del corpo e nell'aria ambiente;

-  $A_w$ : superficie umida della cute

-  $K_e$ : coefficiente di evaporizzazione - dipende da calore latente e dalla velocità dell'aria ambiente sulla cute

# Aspetti quantitativi

- **Capacità termica di un corpo:** rapporto tra la quantità di calore fornita e la variazione di temperatura ( $dQ/dT$ )
- **Calore specifico:** capacità termica di un corpo di massa unitaria

Calore specifico del corpo umano:  $0,83 \text{ kcal/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$

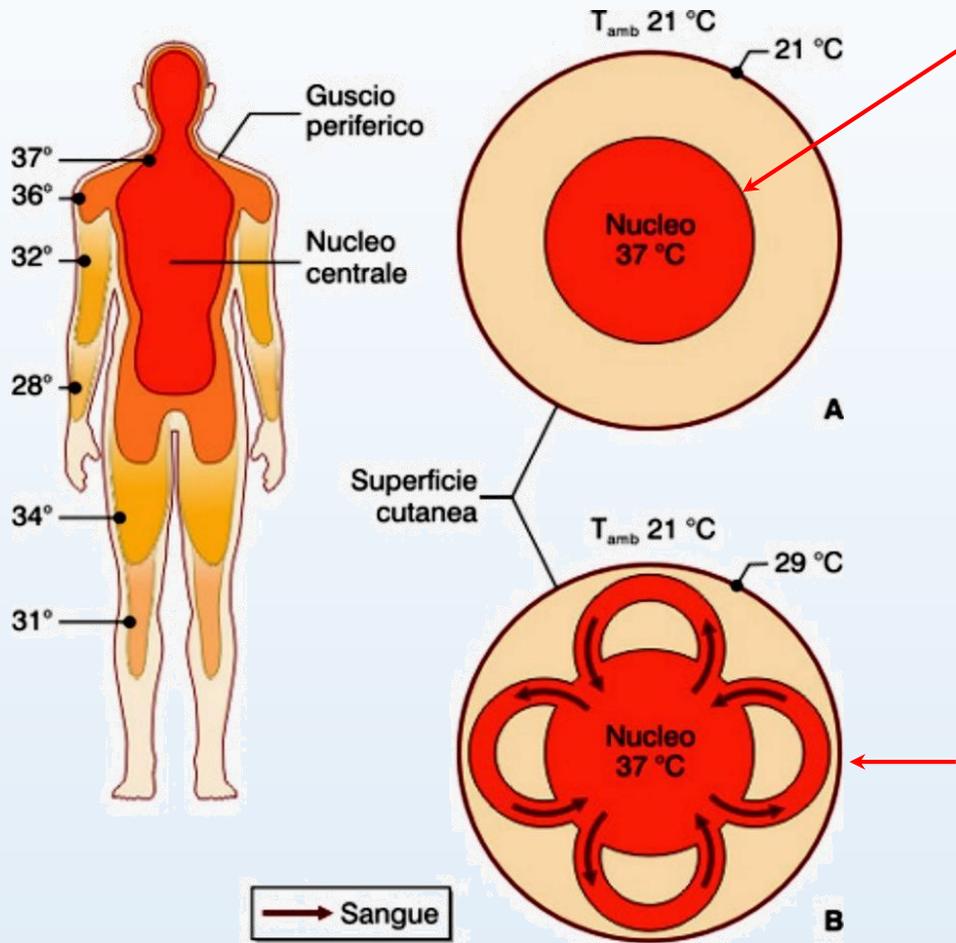
Contenuto di calore di un uomo di 70 kg a  $37^{\circ}\text{C}$ :  $0,83 \times 37 \times 70 = 2150 \text{ kcal}$

Calore per aumentare  $1^{\circ}\text{C} = 0,83 \times 70 = 58 \text{ kcal}$

Produzione di calore a riposo:  $1,45 \text{ kcal/min} = 87 \text{ kcal/h}$

Innalzamento della temperatura a riposo:  $1,5^{\circ}\text{C/h} (87/58)$

# Temperatura corporea



- Nucleo costante

- Punti di rilevamento:

- retto
- bocca
- timpano
- ascella - inguine

- Dipendente da:

- età
- ritmo circadiano
- ormoni
- attività muscolare
- ciclo ovarico

- Guscio variabile

- Dipendente da:

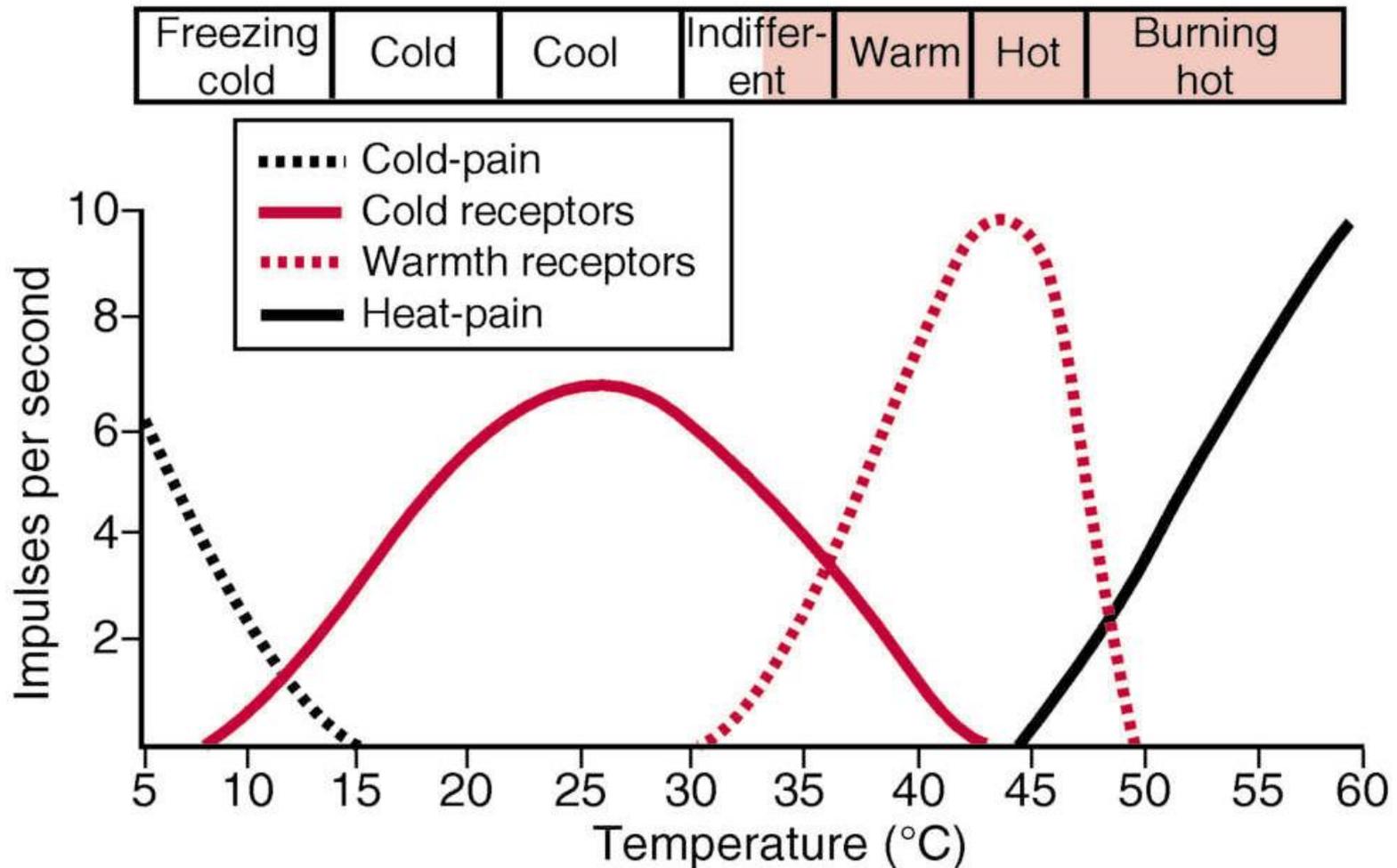
- dispersione verso l'ambiente
- trasmissione dal nucleo

# Termogenesi

- Senza contrazione muscolare  
calore prodotto dalle reazioni chimiche metaboliche  
dipendente da:
  - ormoni (tiroidei - adrenalina)
  - alimentazione
  - stimolazione del grasso bruno
- Con contrazione muscolare
  - Contrazioni involontarie e oscillanti dei muscoli agonisti e antagonisti, senza lavoro esterno (brividi)
  - Contrazioni volontarie (correre sul posto, battere le mani ecc.)

# Meccanismi nervosi che mantengono l'omeotermia

## 1. Termocettori periferici

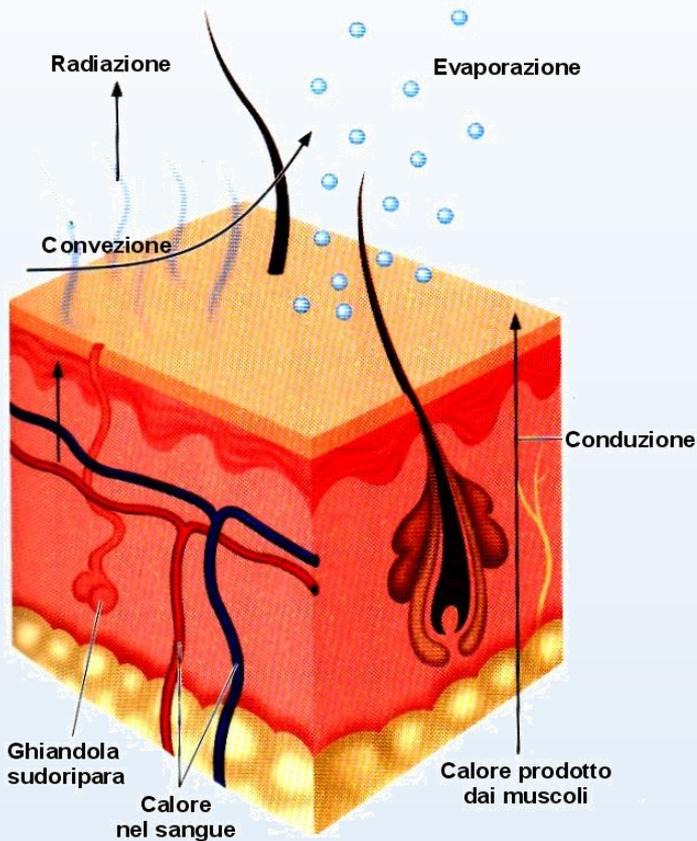


# Termocettori centrali

- Ipotalamo
  - a livello dell' ipotalamo anteriore possono venire indotte risposte termoregolatorie sia al raffreddamento che al riscaldamento
  - frequenza di scarica in dipendenza della temperatura locale
  - +4/-2 °C rispetto alla T media
  - importanti durante esercizio muscolare

# Termolisi

- Irraggiamento
- Conduzione
  - terreno
  - punti di appoggio
- Convezione
  - Tramite aria
  - Tramite acqua
  - Dipendente da:
    - temperatura
    - umidità
    - velocità
- Evaporazione (580 kcal/l)
  - perspiratio insensibilis
  - sudorazione
  - ventilazione



# Perdite di calore a riposo

Meccanismo	% del totale	kcal/min
Conduzione e convezione	20	0,3
Radiazione	60	0,9
Evaporazione	20	0,3

# Composizione del sudore

Soggetti	Na <sup>+</sup> (mmol/L)	Cl <sup>-</sup> (mmol/L)	K <sup>+</sup> (mmol/L)
Maschi	90	60	4
Femmine	105	98	4

# Importanza del clima

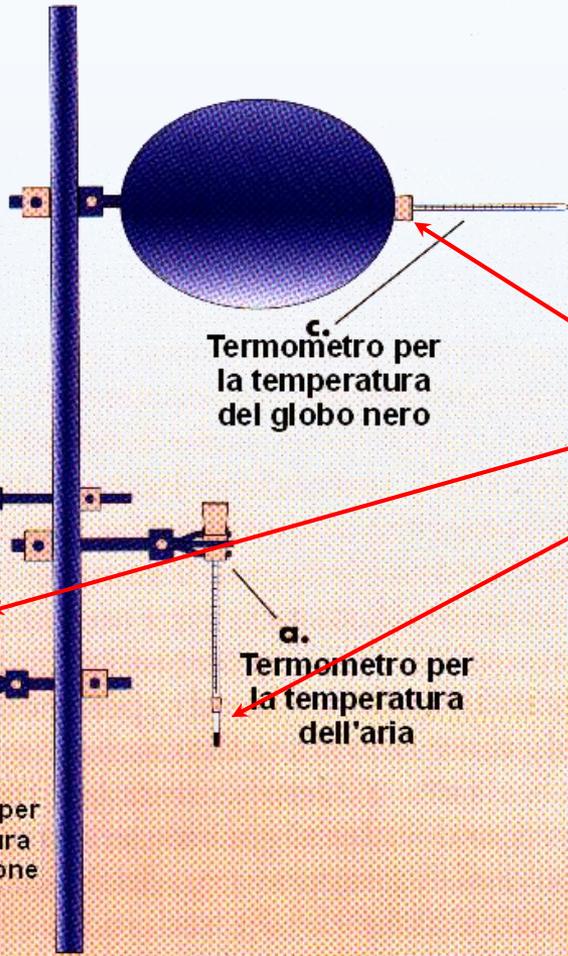
## Temperatura percepita in funzione del vento

	Temperatura effettiva °C											
	10,00	4,44	-1,11	-6,67	-12,22	-17,78	-23,33	-28,89	-34,44	-40,00	-45,56	-51,11
Velocità del vento	Temperatura equivalente °C											
Calma	10,00	4,44	-1,11	-6,67	-12,22	-17,78	-23,33	-28,89	-34,44	-40,00	-45,56	-62,22
8	8,89	2,78	-2,78	-8,89	-14,44	-20,56	-26,11	-32,22	-37,78	-43,89	-49,44	-55,56
16,1	4,44	-2,22	-8,89	-15,56	-22,78	-31,11	-36,11	-43,33	-50,00	-56,67	-63,89	-70,56
24,1	2,22	-5,56	-12,78	-20,56	-27,78	-35,56	-42,78	-50,00	-57,78	-65,00	-72,78	-80,00
32,2	0,00	-7,78	-15,56	-23,33	-31,67	-39,44	-47,22	-55,00	-63,33	-67,78	-78,89	-86,67
40,2	-1,11	-8,89	-17,78	-26,11	-33,89	-42,22	-50,56	-58,89	-66,67	-75,56	-83,33	-91,67
48,3	-2,22	-10,56	-18,89	-27,78	-36,11	-44,44	-52,78	-61,67	-70,00	-78,33	-87,22	-95,56
56,3	-2,78	-11,67	-20,00	-28,89	-37,22	-46,11	-55,00	-63,33	-72,22	-80,56	-89,44	-98,33
64,4	-3,33	-12,22	-21,11	-29,44	-38,33	-47,22	-56,11	-65,00	-73,33	-82,22	-91,11	-100,00

# Temperatura percepita in funzione dell'umidità

	Temperatura ambientale (°C)										
	21	24	27	29	32	35	38	41	43	46	49
Umidità relativa (%)	Sensazione di calore (°C)										
0	18	20	23	26	28	31	33	35	37	39	42
10	18	21	24	27	29	33	35	38	41	44	47
20	19	22	25	28	30	33	37	41	44	49	54
30	19	23	26	29	33	36	40	45	51	57	64
40	20	23	26	30	34	38	43	56	58	66	
50	20	24	27	31	36	42	49	57	66		
60	21	24	28	33	38	46	56	65			
70	21	25	29	34	41	51	62				
80	22	26	30	36	45	58					
90	22	26	31	39	50						
100	22	27	33	42							

# Misura dello stress termico



## Wet Bulb Globe Thermometer

$T_G$  = temperatura del globo nero

$T_{WB}$  = temperatura aria umida

$T_{DB}$  = temperatura aria secca

$$WBGT = 0.1T_{DB} + 0.7T_{WB} + 0.2T_G$$

# ARGOMENTI

Bilancio del calore del corpo

Meccanismi di termogenesi e termolisi

Risposte fisiologiche al caldo e al freddo

Termoregolazione nel lavoro muscolare

Equilibrio idrico e attività fisica

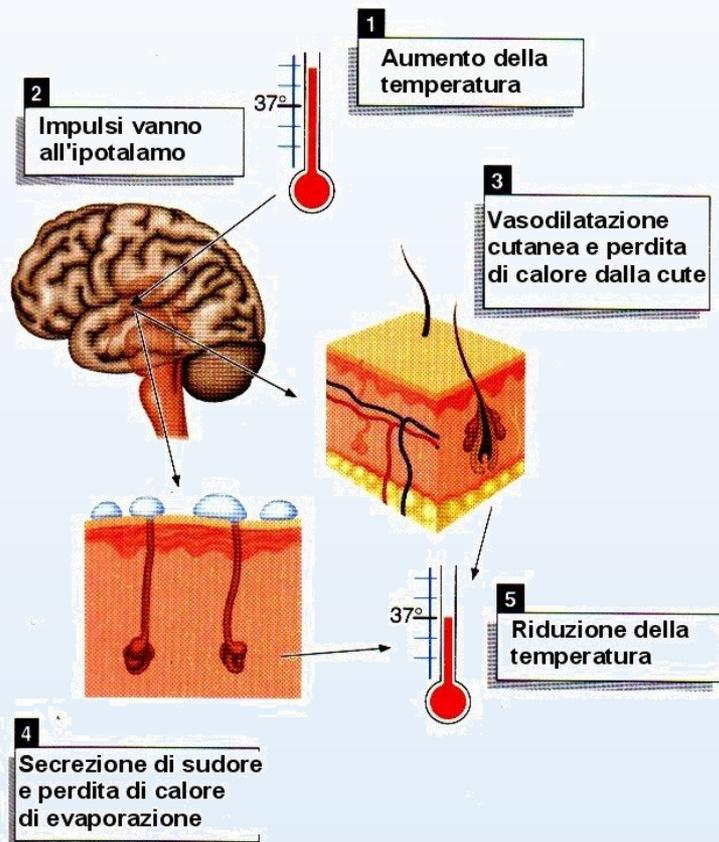
Acclimatazione al caldo e al freddo

# Risposte fisiologiche

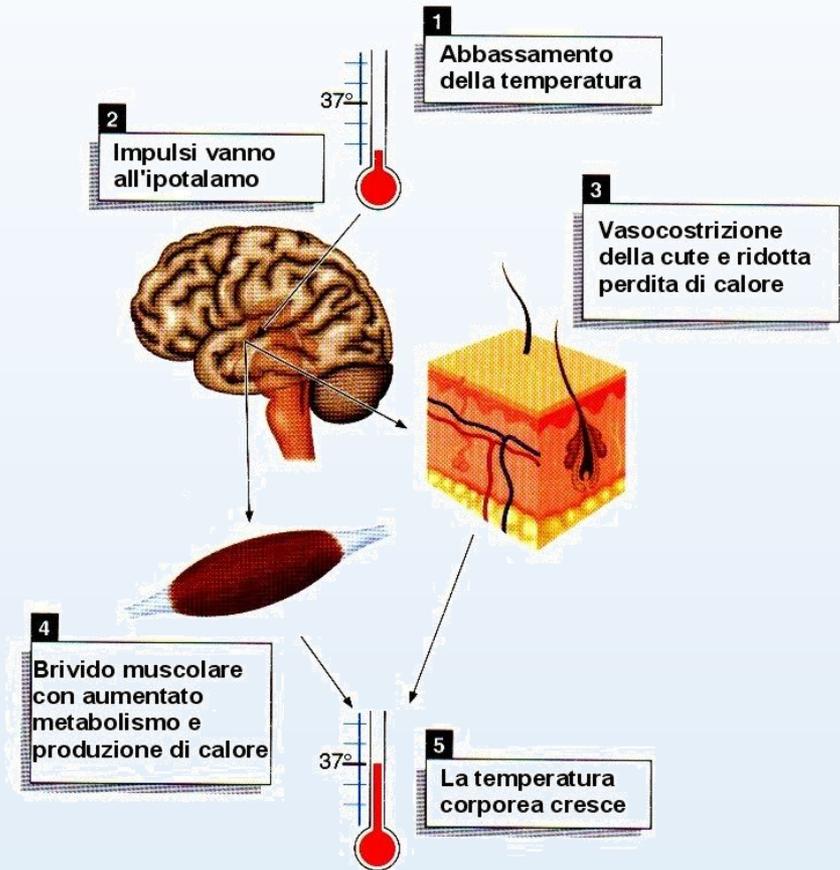
- Termorecettori
  - Periferici (cute)
  - Centrali (ipotalamo)
- Centro d'integrazione: ipotalamo
- Risposte al freddo:
  - Vasocostrizione cutanea
  - Brivido
  - Metabolismo (SNV ed ormoni)
  - Comportamento
- Risposte al caldo:
  - Vasodilatazione cutanea
  - Sudorazione
  - Comportamento

# Riflessi termoregolatori

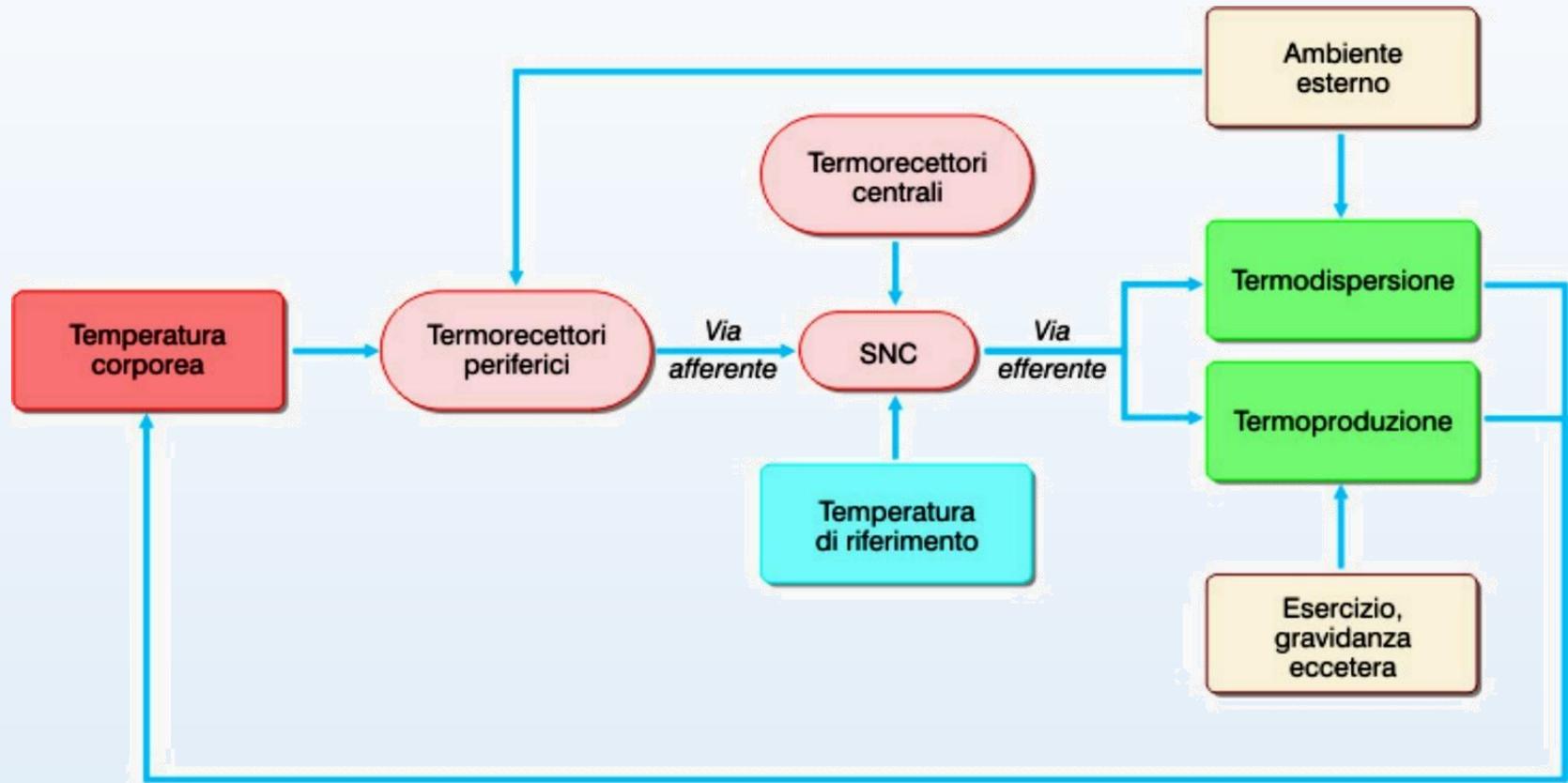
## Ipertermia



## Ipotermia



# Meccanismo di integrazione



# Regolazione della temperatura

1. Zona della regolazione vasomotoria
  - stress termico lieve- esercizio muscolare moderato
  - gli indumenti sono scelti per rimanere in questa zona
2. Zona della regolazione metabolica
  - termogenesi metabolica (brivido) quanto  $I_t$  e  $I_v$  non sono sufficienti a mantenere  $T_c$  costante
3. Zona di regolazione sudomotoria
  - lavoro muscolare intenso

# Termolisi durante l'esercizio

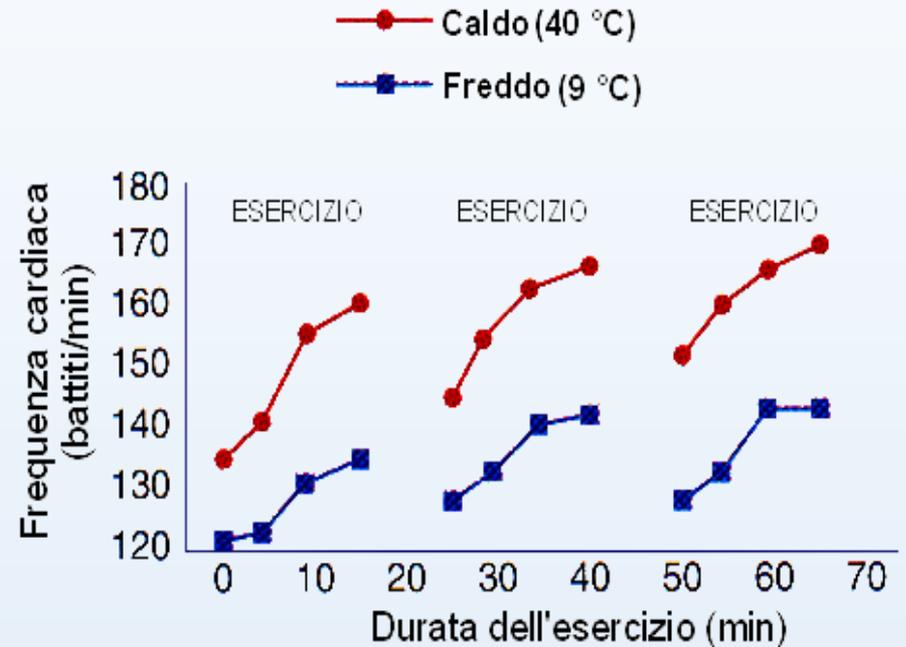
- Aumento della convezione per vasodilatazione
- Aumento dell'evaporazione per ipersudorazione

## Valori quantitativi

Meccanismo	Riposo		Esercizio	
	% del totale	kcal/min	% del totale	kcal/min
Conduzione e convezione	20	0,3	15	2,2
Radiazione	60	0,9	5	0,9
Evaporazione	20	0,3	80	12,0

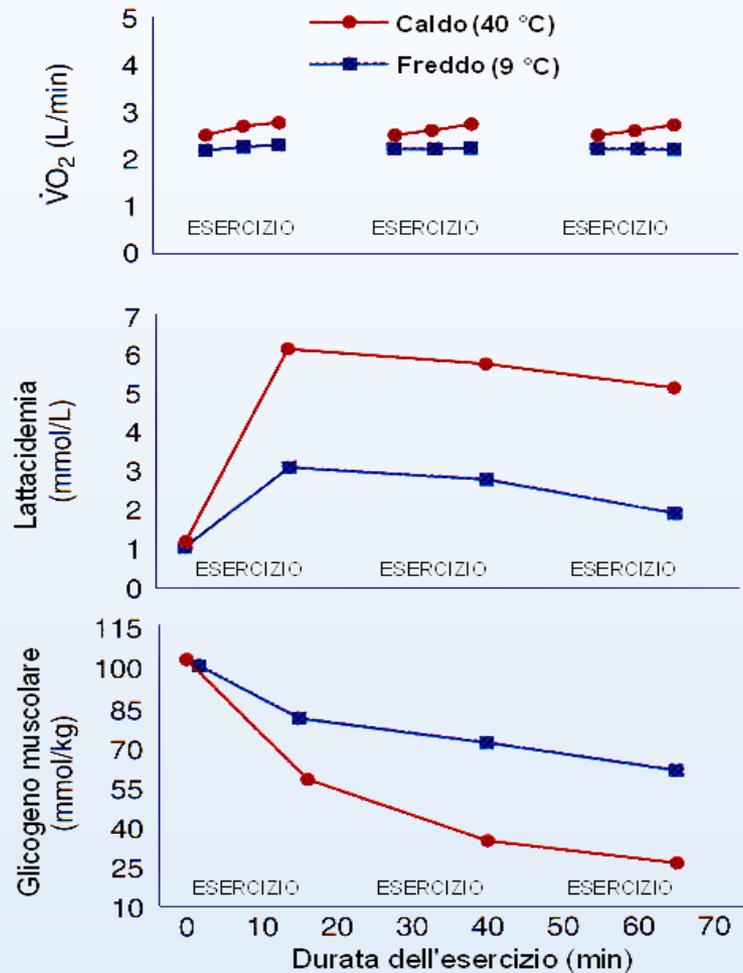
# Effetti sul sistema cardiocircolatorio

- Ridistribuzione della portata
- Riduzione del ritorno venoso
- Riduzione del VTD
- Abbassamento della pressione arteriosa sistemica
- Aumento della frequenza



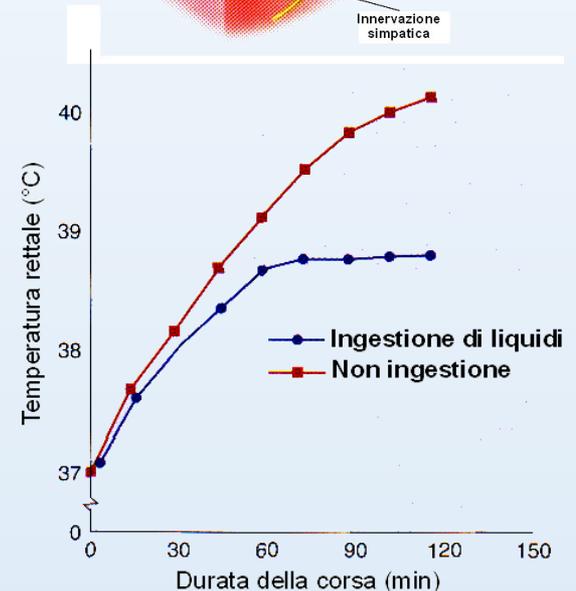
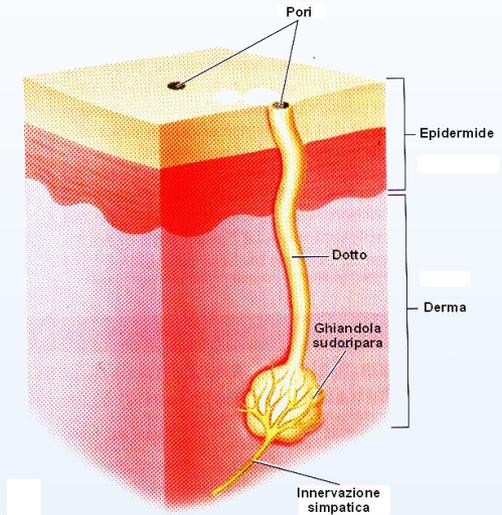
# Effetti sul metabolismo muscolare

- Aumentato consumo di O<sub>2</sub>
- Aumentata produzione di ac. lattico
- Aumentato consumo di glicogeno

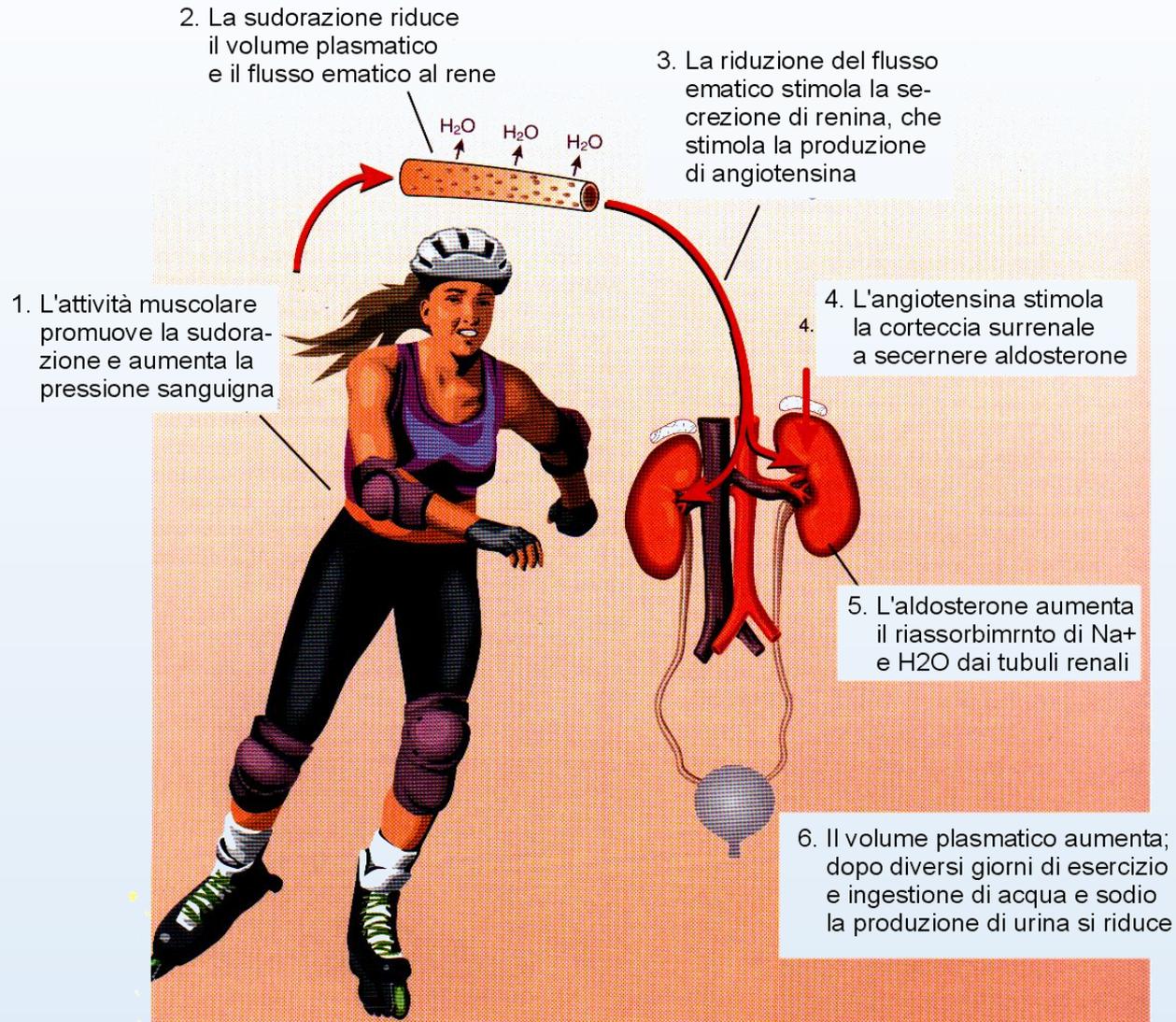


# Effetti sull'equilibrio idrico

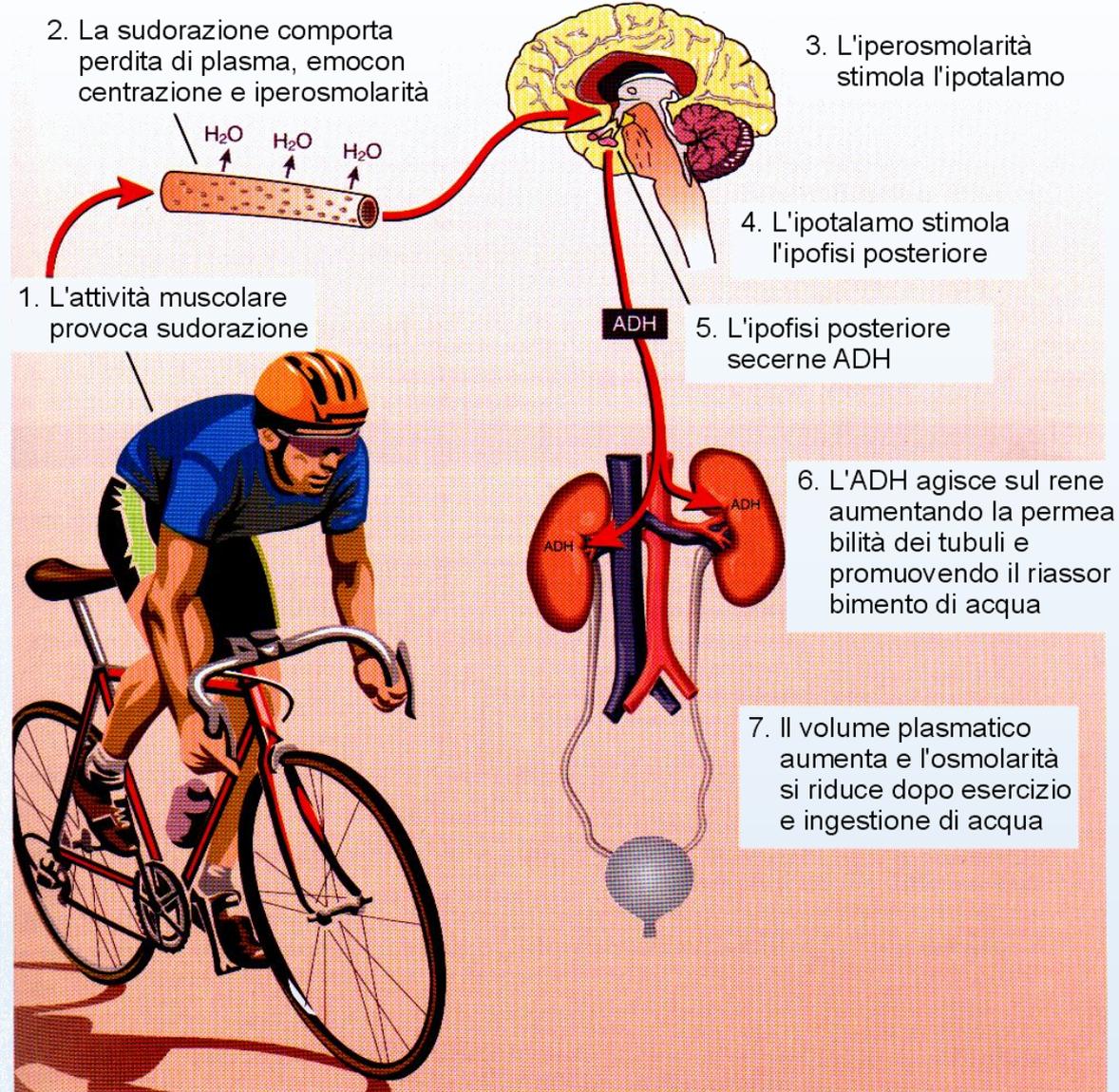
- Ipersudorazione
- Perdita d'acqua (1 L/h/m<sup>2</sup>)  
1.5-3.5/h
- Perdita di elettroliti
  - ipovolemia
  - ipoefficienza fisica
- Ripristino idro-elettrolitico
  - Sete
  - Secrezione di Aldosterone
  - Secrezione di ADH



# Secrezione di aldosterone



# Secrezione di ADH

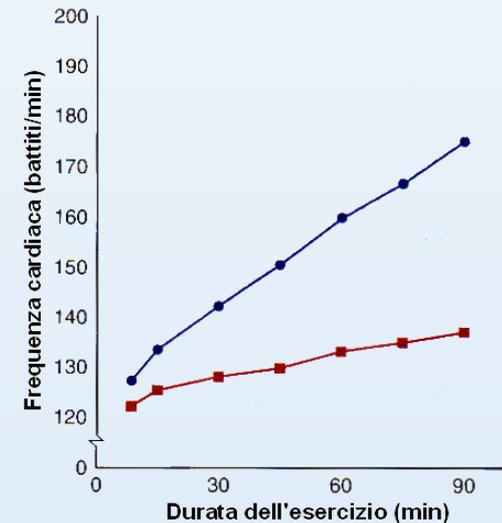
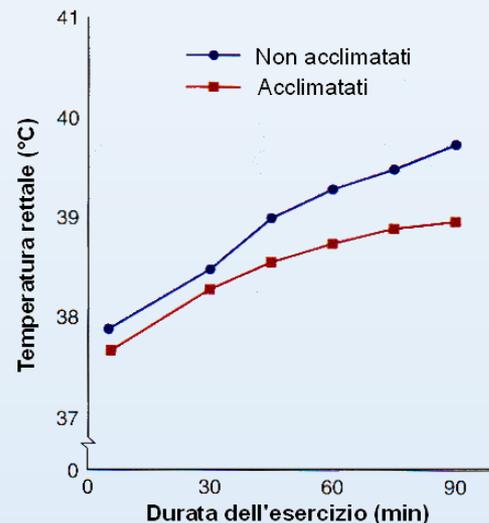


# Acclimatazione al caldo

- Maggiore sudorazione nelle aree esposte
- Precocità della sudorazione
- Sudore più diluito (risparmio di sali)
- Minore rialzo termico
- Minore incremento di frequenza cardiaca per:
  - Aumento della volemia (ritenzione di Na<sup>+</sup>)
  - Riduzione dell'irrorazione cutanea
  - Aumento del VTD

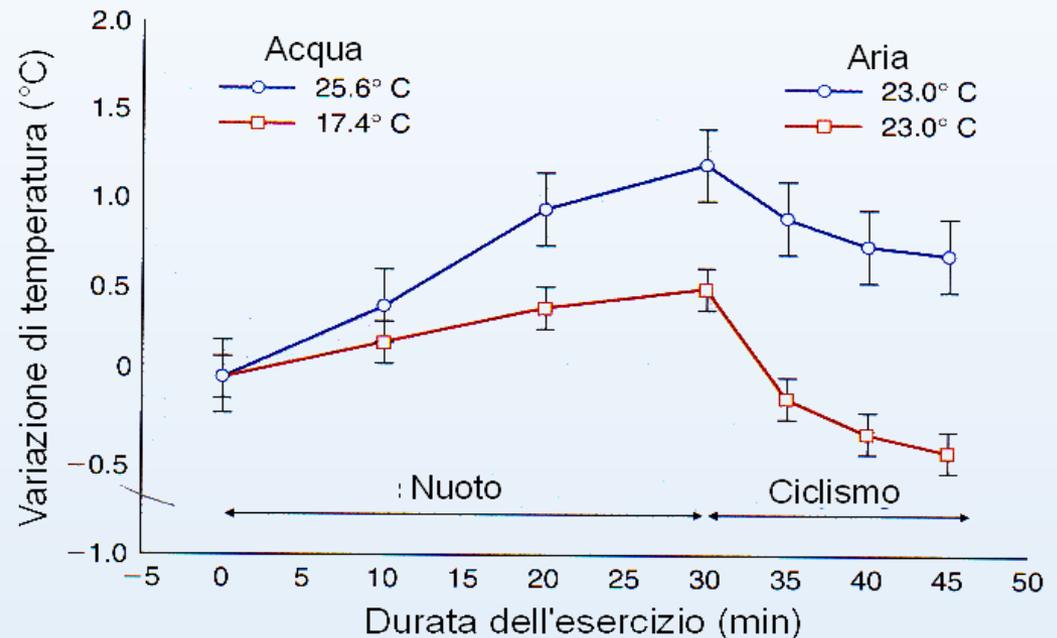
Composizione del sudore

Soggetti	Na <sup>+</sup> (mmol/L)	Cl <sup>-</sup> (mmol/L)	K <sup>+</sup> (mmol/L)
Maschi non allenati	90	60	4
Maschi allenati	35	30	4
Femmine non allenate	105	98	4
Femmine allenate	62	47	4



# Esercizio in ambiente freddo

- Cause di raffreddamento
  - vasocostrizione
  - vento
  - immersione



# Effetti del freddo sulla prestazione fisica

- Minore forza muscolare
- Minore reclutamento di unità motorie
- Minore velocità di accorciamento
- Minore potenza
- Maggiore affaticamento
- Minore uso di FFA (vasocostrizione cutanea)

# Bibliografia

- **Fisiologia dell'uomo, autori vari, edi.ermes, Milano**
  - **Capitolo 19: Termoregolazione**