



Coordinació cardiorespiratòria durant la recuperació després de l'exercici: un indicador nou per avaluar la salut

Óscar Abenza^{1,2} , Lluç Montull^{3*} , Casimiro Javierre⁴ i Natàlia Balagué²

¹ Facultat de Medicina i Ciències de la Salut, Universitat de Barcelona, Barcelona (Espanya).

² Grup de Recerca en Sistemes Complexos i Esport, Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), Universitat de Barcelona (UB), Barcelona (Espanya).

³ Grup de Recerca en Sistemes Complexos i Esport, Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), Universitat de Lleida (UdL), La Seu d'Urgell (Espanya).

⁴ Departament de Ciències Fisiològiques, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona (Espanya).

Citació

Abenza, Ó., Montull, L., Javierre, C. & Balagué, N. (2025). Cardiorespiratory coordination during exercise recovery: a novel measure for health assessment. *Apunts Educación Física y Deportes*, 159, 1-9. [https://doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.\(2025/1\).159.01](https://doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.(2025/1).159.01)

Resum

La coordinació cardiorespiratòria (CCR), variable biològica recentment identificada que avalua la interacció entre els paràmetres derivats de les proves d'esforç cardiopulmonar (PECP), ha demostrat una elevada sensibilitat als efectes de l'entrenament i als trastorns funcionals. Atès el paper crític de la recuperació després de l'exercici en la detecció de desregulacions funcionals, aquest estudi té per objectiu explorar la CCR durant la recuperació després de l'exercici en persones adultes sanes i físicament inactives. Quinze participants es van sotmetre a una PECP piramidal fent càrregues de treball idèntiques (en ordre invers) durant les fases d'intensitat creixent i de recuperació (d'intensitat decreixent). Es va dur a terme una anàlisi dels components principals de les variables cardiorespiratòries seleccionades per avaluar la CCR. Així mateix, es van calcular el valor propi del primer component principal i l'entropia informativa. Els participants es van classificar en funció de si presentaven un o dos components principals (grups 1CP i 2CP) durant la fase de recuperació de la PECP. Els resultats van revelar que: a) la CCR va ser més gran durant la fase de recuperació que durant la fase d'intensitat creixent ($t = -2.67$; $p < .01$; $d = -0.72$); b) el grup 1CP va mostrar valors propis més alts ($t = 3.756$; $p < .01$; $d = 2.09$) i menys entropia informativa ($U = 0.00$; $p < .01$; $d = 15.83$) que el grup 2CP; i c) el grup 1CP va tenir una freqüència cardíaca, una ventilació i una valoració de l'esforç percebut al final de la fase de recuperació inferiors a les del grup 2CP ($d = 1.21$; $d = 0.57$; $d = 0.71$; respectivament). En conclusió, la CCR va augmentar durant la recuperació després de l'exercici, i els participants amb menys components principals en la fase de recuperació van mostrar una eficiència cardiorespiratòria més gran i una millor forma física.

Paraules clau: anàlisi de components principals, capacitat cardiorespiratòria, entropia, exercici piramidal a intensitat submàxima, fisiologia en xarxa de l'exercici, prova d'esforç.

Editat per:

© Generalitat de Catalunya
Departament d'Esports
Institut Nacional d'Educació
Física de Catalunya (INEFC)

ISSN: 2014-0983

*Correspondència:

Lluç Montull
lluçmontull@gmail.com

Secció:

Activitat física i salut

Idioma de l'original:

Anglès

Rebut:

26 d'abril de 2024

Acceptat:

17 de juliol de 2024

Publicat:

1 de gener de 2025

Coberta:

Laura Kluge lluita pel disc en el partit entre Alemanya i Hongria durant l'Eishockey Deutschland Cup, a Landshut, Alemanya, el 9 de novembre de 2024. © IMAGO/ActionPictures/laforoteca.com

Introducció

La prova d'esforç cardiopulmonar (PECP) s'aplica àmpliament en la praxi clínica per avaluar la reserva cardíaca i la capacitat cardiorespiratòria de tot tipus de grups demogràfics (Balady et al., 2010). No obstant això, les variables fisiològiques aïllades (per exemple, la freqüència cardíaca [FC], el volum respiratori per minut [VRP], el consum d'oxigen [VO_2], etc.) i els paràmetres relacionats (per exemple, el llindar ventilatori, la relació d'intercanvi respiratori, etc.) a penes informen sobre la coordinació dinàmica de la funció cardiorespiratòria durant l'exercici (Balagué et al., 2016; Garcia-Retortillo et al., 2017).

La coordinació cardiorespiratòria (CCR), proposada com a variable per mesurar les interaccions entre paràmetres derivats de les PECP, ha estat molt útil per detectar de manera sensible les diferències entre diversos factors, com ara exercicis a intensitat màxima repetits (Garcia-Retortillo et al., 2017), grups demogràfics diversos amb alteracions cromosòmiques i sense (Oviedo et al., 2021), nivells d'entrenament hipòxic (Krivoshchekov et al., 2021), plans d'entrenament diferents (Balagué et al., 2016; Garcia-Retortillo et al., 2019) i manipulacions dietètiques (Esquius et al., 2022). Tot i així, les seves possibilitats de comprovació i diagnòstic en els àmbits mèdic i esportiu encara han estat poc explorades.

La CCR s'ha avaluat habitualment mitjançant l'anàlisi de components principals (ACP), tècnica que identifica els patrons de covariació subjacents entre les dades de sèries temporals de diferents variables cardiorespiratòries (Balagué et al., 2016). Quan les variables comparteixen una covariació baixa, augmenta el nombre de components principals (CP), i viceversa. Els CP plasmen la variabilitat compartida entre aquestes variables en ordre decreixent d'importància. Per tant, el primer component principal (CP_1) representa la màxima covariació entre variables i es considera la variable de coordinació, mentre que cada un dels components següents (CP_2 , CP_3 , etc.) recull una variància compartida progressivament inferior (Balagué et al., 2016). El nombre total de CP reflecteix el nivell de coordinació entre les variables cardiorespiratòries estudiades, per la qual cosa un nombre menor de CP suggereix una coordinació més eficient (Balagué et al., 2016). En canvi, un augment del nombre de CP pot indicar la formació de nous patrons coordinatius (Haken, 2000) i, per tant, una eficiència inferior. S'ha demostrat que aquesta eficiència inferior es deu a l'acumulació d'esforç (Garcia-Retortillo et al., 2017; Garcia-Retortillo et al., 2019), als trastorns cardiorespiratoris (Oviedo et al., 2021) i als efectes de l'entrenament hipòxic (Krivoshchekov et al., 2021).

Com a complement de l'ACP, l'índex d'entropia informativa serveix d'eina per avaluar la complexitat dels estats de coordinació dins del sistema (Seely i Macklem, 2012). Una entropia més gran indica un estat més desordenat del sistema, per la qual cosa es necessita una quantitat d'informació més gran per descriure'n l'estat

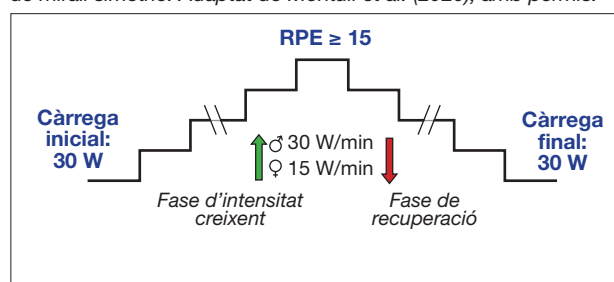
actual. En canvi, a mesura que el sistema s'estabilitza en menys estats, la seva entropia disminueix (Naudts, 2005). La sensibilitat de la CCR als efectes de l'acumulació d'esforç i a la sobrecàrrega general sembla que ofereix informació més rellevant sobre la càrrega interna en comparació amb variables comunament utilitzades com ara la càrrega de treball màxima o el consum màxim d'oxigen (Balagué et al., 2016; Garcia-Retortillo et al., 2017).

Els protocols de PECP solen incloure exercicis d'intensitat creixent i màxima amb períodes de descans curts (de 3 a 10 minuts) o fases de recuperació activa a intensitat submàxima amb una càrrega de treball constant. No obstant això, l'avaluació del període de recuperació després de l'exercici conté informació crucial sobre l'adaptabilitat dels sistemes reguladors durant l'exercici. La recuperació després de l'exercici representa una fase dinàmica en què diversos mecanismes actius proven de tornar als seus estats inicials (Bartels et al., 2018; Romero et al., 2017). L'aparell cardiovascular, concretament, assumeix un paper clau en la redistribució de la sang per satisfer la demanda d'energia i oxigen que es produeixi en cada moment, i aconseguir una regulació ràpida després de l'exercici és fonamental per a la salut cardiovascular (Pocock et al., 2013). Per tant, la recuperació després de l'exercici es pot considerar una fase determinant per detectar disfuncions de coordinació entre els aparells cardiovascular i respiratori.

Un protocol d'exercici piramidal (vegeu la Figura 1), que implica càrregues de treball progressivament creixents i després simètricament decreixents, pot revelar una possible desregulació de les funcions cardiorespiratòries. La reducció gradual de la intensitat podria proporcionar indicadors sensibles de l'eficàcia de la recuperació i l'eficiència de l'aparell cardiorespiratori. Si bé encara no s'ha emprat un protocol d'exercici piramidal per avaluar la CCR, aquest resulta especialment valuós per comparar les respostes cardiorespiratòries amb la mateixa càrrega de treball entre la fase d'intensitat creixent i la de recuperació (decreixent). En conseqüència, aquest permet avaluar la recuperació després de l'exercici després de sotmetre's a càrregues de treball cada vegada més grans (Montull et al., 2020).

Figura 1

Protocol d'exercici piramidal amb bicicleta estàtica amb càrregues de treball (CT) progressivament creixents i decreixents en forma de mirall simètric. Adaptat de Montull et al. (2020), amb permís.



Aquest estudi tenia per objectiu explorar el potencial d'avaluació de la CCR durant la recuperació després de l'exercici utilitzant un protocol piramidal a intensitat submàxima per avaluar la capacitat cardiorespiratòria de persones adultes sanes i físicament inactives. La nostra hipòtesi era que la fase de recuperació presentaria un nombre reduït de CP i una entropia informativa inferior en comparació amb la fase d'intensitat creixent. A més, es preveia que les persones amb menys capacitat cardiorespiratòria mostrarien un nombre superior de CP, una entropia informativa més gran i una pitjor recuperació psicobiològica durant la fase de recuperació.

Metodologia

Participants

Quinze persones sanes però inactives (menys de 30 min d'activitat física diària) (set homes i vuit dones: 53.07 ± 3.31 anys; 169.27 ± 13.26 cm; 80.24 ± 13.26 kg; i amb IMC de 28.43 ± 6.57 kg·m⁻²) van participar voluntàriament en l'estudi. Mitjançant una anàlisi de potència amb G*Power 3.1 (Faul et al., 2007) per determinar la mida de la mostra, i tenint en compte les grans mides de l'efecte de la CCR durant l'exercici (Balagué et al., 2016), estimem una mida de mostra de 12 participants ($d = 1$, $\alpha < .05$, potència $(1 - \beta) = .80$).

Els criteris d'exclusió van ser els següents: (a) malalties cardiovasculars; (b) contraindicacions per a l'exercici, i (c) ús de medicaments que poguessin influir en la resposta de la FC a l'exercici. Després de compartir aquesta informació sobre els procediments de l'estudi, els participants van firmar un consentiment informat abans de la intervenció. Els procediments experimentals van ser aprovats pel Comitè d'ètica d'investigació clínica de l'esport de la Generalitat de Catalunya (ref. 07/2015/CEICEGC) i es va dur a terme d'acord amb la Declaració de Hèlsinki.

Procediments

Es va aplicar un protocol d'exercici piramidal utilitzant un cicloergòmetre (Excalibur, Lode, Groningen, Països Baixos) (vegeu la Figura 1). Després d'un escalfament amb bicicleta a 30 W, la càrrega de treball es va incrementar en 30 W/MIN (homes) i en 15 W/MIN (dones), fins que els participants van informar d'una percepció subjectiva de l'esforç (RPE, per les sigles en anglès) ≥ 15 (dur) en l'escala de Borg de 6 a 20. En aquest punt, la càrrega de treball es va reduir de manera inversa fins als 30 W. La freqüència de pedaleig es va mantenir sempre a 70 rpm. Es van donar a conèixer als participants els procediments

de prova i l'escala RPE (de 6 a 20) (Borg, 1998) durant exercicis d'intensitat creixent submàxima en almenys dues ocasions durant el mes previ a l'experiment.

Obtenció de dades

Durant la prova, els participants van respirar a través d'una vàlvula (Hans Rudolph, 2700. Kansas City, MO, EUA) i es va determinar l'intercanvi de gasos respiratoris mitjançant un sistema automatitzat de circuit obert (Metasys, Brainware, La Valette, França). Es va registrar el contingut d'oxigen (O₂), el contingut de diòxid de carboni (CO₂) i el cabal d'aire respiració a respiració. Simultàniament, el sistema Metasys va registrar la FC durant el mateix període. Abans de cada assaig, es va calibrar el sistema utilitzant una mescla de composició coneguda d'O₂ i CO₂ (15 % d'O₂, 5 % de CO₂, N₂ equilibrat) (Carbueros Metálicos, Barcelona, Espanya) i aire ambiental. Els participants van ser supervisats de manera contínua mitjançant un electrocardiograma de 12 derivacions (CardioScan v.4.0. DM Software, Stateline, Nevada, EUA).

Les proves es van dur a terme en un laboratori ben ventilat amb una temperatura ambient de 23 °C i una humitat relativa del 48 %, amb variacions mínimes de no més d'1 °C en la temperatura i d'un 10 % en la humitat relativa. Els participants van fer la prova almenys 3 h després d'un àpat lleuger i sense practicar activitats físiques intensives les 72 h prèvies a l'experiment (Balagué et al., 2016).

Anàlisi de les dades

En primer lloc, les sèries de dades de les variables cardiorespiratòries seleccionades (fracció d'oxigen exhalat "FeO₂", fracció de diòxid de carboni exhalat "FeCO₂", FC i VRP) es van dividir en dues fases: d'intensitat creixent i de recuperació. Es van excloure de l'anàlisi altres variables cardiorespiratòries comunament utilitzades en PECP (per exemple, la relació d'intercanvi respiratori, el pols d'oxigen, el VO₂, el volum sistòlic, etc.) a causa de la seva relació matemàtica amb les variables anteriors (Balagué et al., 2016).

Anàlisi dels components principals

A continuació, es va dur a terme una ACP amb les variables cardiorespiratòries seleccionades per a cada fase. Abans de fer l'ACP, es van calcular la prova d'esfericitat de Barlett i l'índex Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) de cada participant per avaluar la idoneïtat d'aplicar l'ACP (Jolliffe, 2002). El nombre de CP es va determinar utilitzant el criteri de Kaiser-Guttman, tractant els CP amb valors propis $\lambda \geq 1.00$ com a significatius (Jolliffe, 2002). La solució d'eficiència òptima dels CP extrets es va obtenir mitjançant rotació ortogonal Varimax (Meglen, 1991).

Atès l'interès a estudiar la CCR durant la recuperació després de l'exercici, es van distingir dos grups en funció del nombre de CP en la fase de recuperació: participants amb 1 CP (grup 1CP; $n \pm 6$) i participants amb 2 CP (grup 2CP; $n \pm 9$).

Anàlisi de l'entropia informativa

Per quantificar el grau de coordinació entre els subsistemes cardiorespiratoris implicats de cada participant durant les dues fases, es va calcular l'índex d'entropia informativa de la manera següent:

$$H \pm \Sigma [1/2 \ln (\lambda) + 1/2 \ln (\pi) + 1/2]$$

On H és l'entropia informativa del sistema, λ és el valor propi del CP i π és el nombre de Ludolph. Aquesta suma incloïa tots els valors propis de les PECP (per exemple, en una prova amb 2 CP, la suma es feia sobre dos valors propis pertanyents al CP_1 i al CP_2 , respectivament).

Comparació de les fases d'intensitat creixent i de recuperació

Per comparar els valors propis del CP_1 i l'entropia informativa entre les fases d'intensitat creixent i de recuperació de la prova, es van utilitzar la prova U de Mann-Whitney i la prova t aparellada, respectivament. Es va triar el CP_1 perquè contenia la proporció de variància més gran de les dades. Així mateix, es van avaluar les diferències dels resultats entre els grups 1CP i 2CP durant la fase de recuperació mitjançant la prova U de Mann-Whitney i la prova t independent, respectivament. Les diferències estandarditzades es van demostrar mitjançant la prova d de Cohen, considerant mides de l'efecte mitjanes i grans ($d \geq 0.5$ i $d \geq 0.8$, respectivament; Cohen, 1988).

Projeccions ortogonals del CP_1 durant la fase de recuperació entre els grups 1CP i 2CP

Es va fer una comparació de les projeccions del CP_1 de totes les variables entre els grups 1CP i 2CP durant la fase de recuperació mitjançant la prova U de Mann-Whitney i les mides de l'efecte (d de Cohen).

Eficàcia de la recuperació psicobiològica i rendiment entre els grups 1CP i 2CP

Els valors de FC, VRP, VO_2 i RPE al final de la fase de recuperació i de tota la prova es van comparar entre els grups 1CP i 2CP mitjançant la prova de Mann-Whitney i les mides de l'efecte (d de Cohen).

Totes les anàlisis estadístiques es van fer mitjançant RStudio (RStudio, Inc., 2023), i el nivell de significació predeterminat es va fixar en $p < .05$.

Resultats

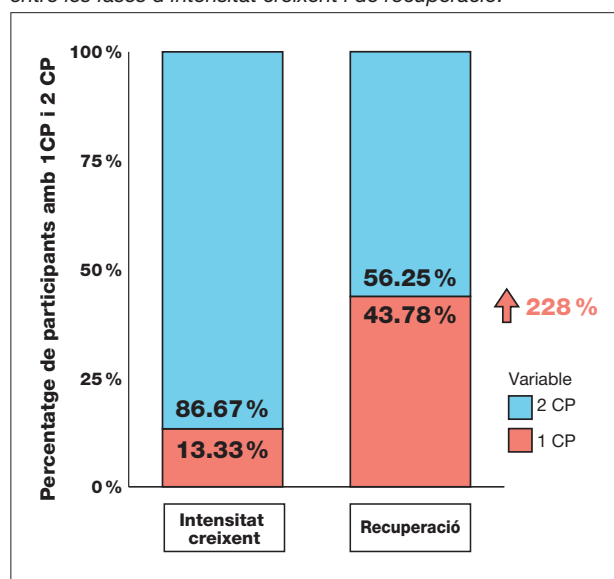
L'ACP i l'entropia informativa de variables cardiorespiratòries durant les fases d'intensitat creixent i de recuperació

La prova d'esfericitat de Barlett va presentar un resultat molt significatiu ($p < .001$), la qual cosa confirma la idoneïtat de les dades de l'ACP. L'índex Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) va mostrar una adequació satisfactòria del mostreig, tant en la fase d'intensitat creixent (0.60 ± 0.07) com en la fase de recuperació per als dos grups: 1CP (0.69 ± 0.06) i 2CP (0.52 ± 0.07).

Durant la fase de recuperació, el percentatge de participants que van mostrar 1 CP va evidenciar un augment del 228 % en comparació amb la fase d'intensitat creixent, tal com es mostra a la Figura 2.

Figura 2

Percentatge de participants amb un i dos components principals entre les fases d'intensitat creixent i de recuperació.



La Figura 3 il·lustra que els valors propis del CP_1 , els quals representen la part predominant de la variància de les dades, van ser lleugerament superiors en la fase d'increment (2.57 ± 0.18) que en la fase de recuperació (2.28 ± 0.51) ($d = -0.76$). L'entropia informativa també va ser significativament més gran durant la fase d'intensitat creixent (2.54 ± 0.39) en comparació amb la fase de recuperació (2.20 ± 0.54) ($t = -2.67$; $p < .01$; $d = -0.72$).

En comparar els dos grups dins de la fase de recuperació, els valors propis del CP_1 van ser significativament més grans en el grup 1CP (2.71 ± 0.32) en comparació amb el grup 2CP (1.99 ± 0.39) ($t = 3.756$; $p < .01$; $d = 2.09$). En la mateixa fase, el grup 1CP va mostrar una entropia informativa notablement inferior (1.57 ± 0.06) a la del grup 2CP (2.62 ± 0.07) ($U = 0.00$; $p < .01$; $d = 15.83$) (vegeu la Figura 4).

Figura 3

Comparació (a) del valor mitjà del CP1 (λ) i (b) de l'entropia informativa mitjana (H) entre les fases d'intensitat creixent i de recuperació (* $p < .05$).

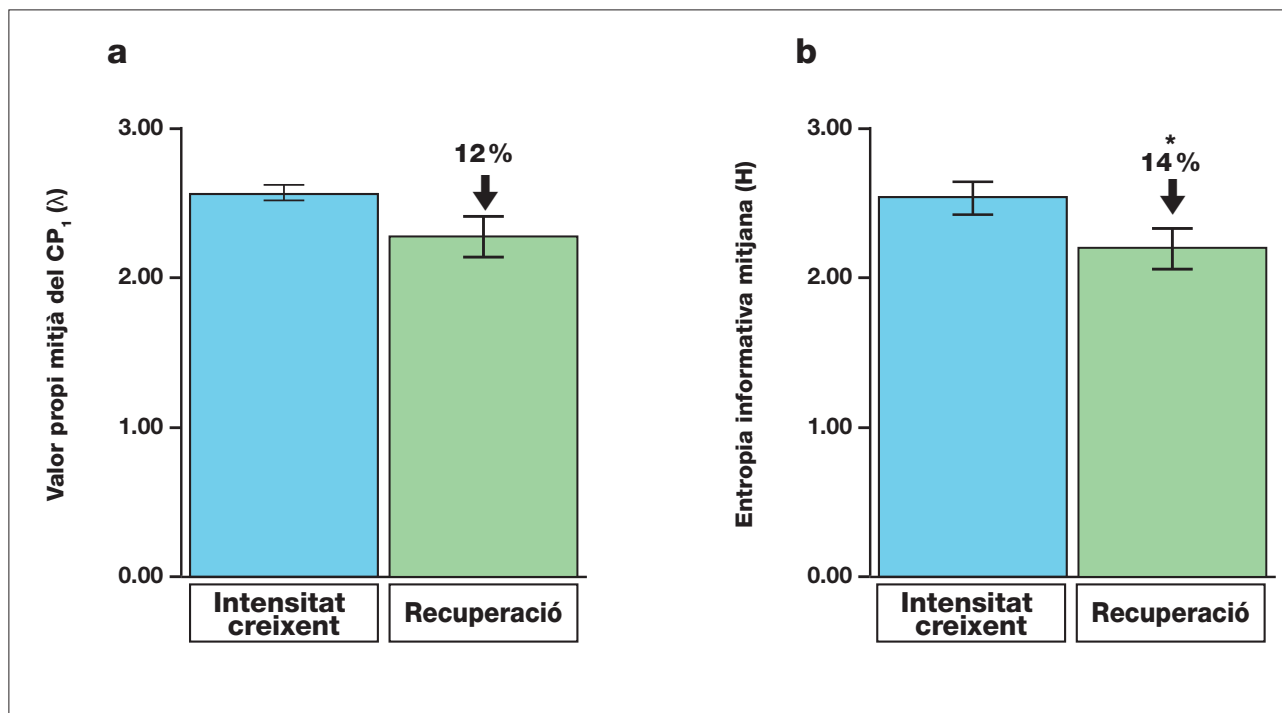
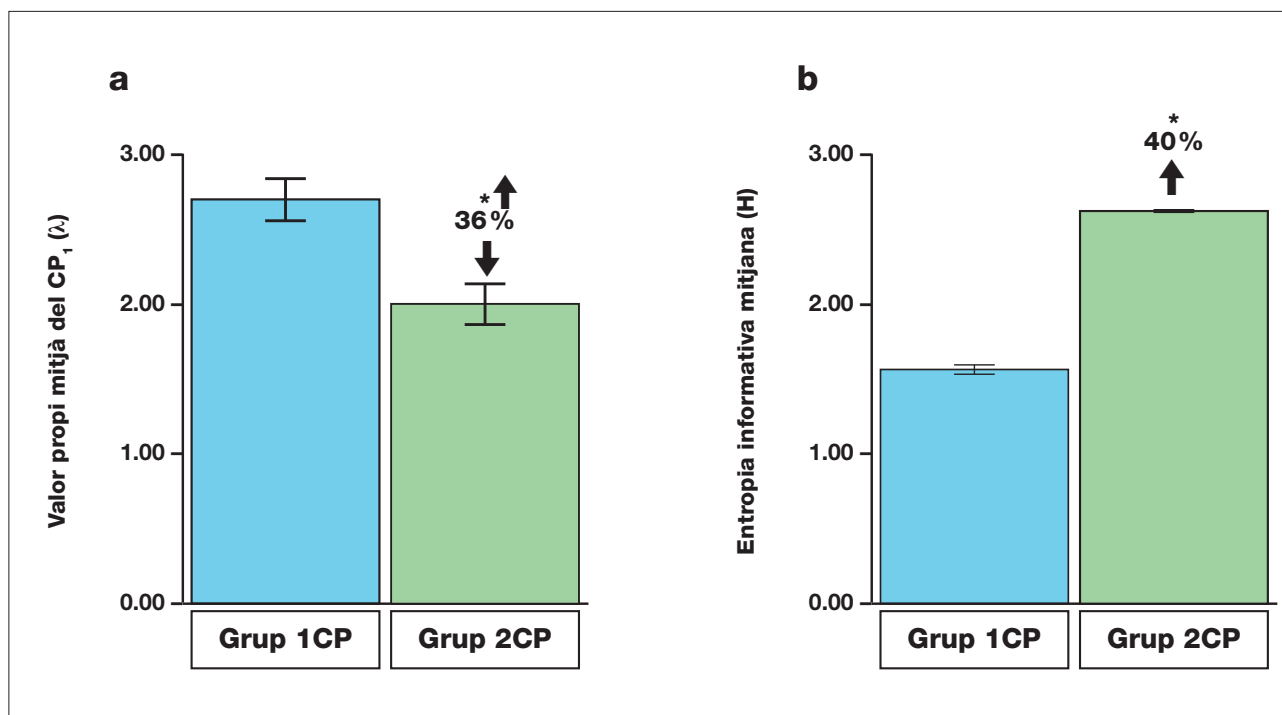


Figura 4

Comparació (a) del valor mitjà del CP1 (λ) i (b) de l'entropia informativa mitjana (H) entre els grups 1CP i 2CP durant la fase de recuperació (* $p < .05$).



Taula 1

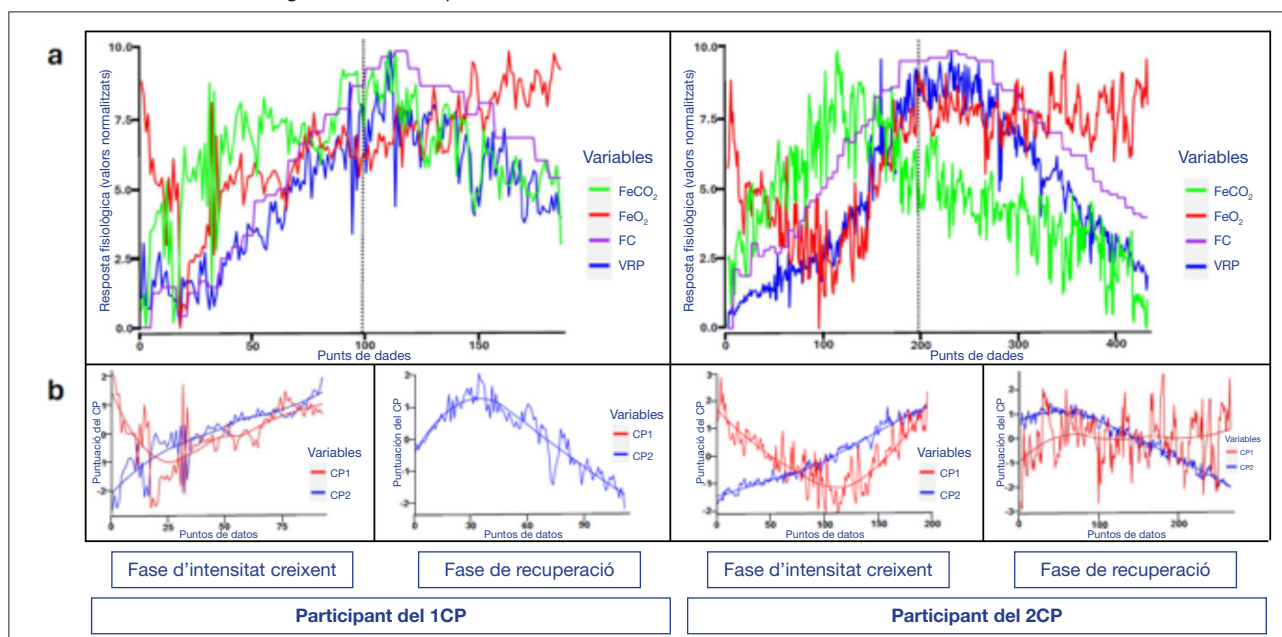
Projeccions ortogonals de les variables sobre CP₁ per als participants dels dos grups durant la fase de recuperació.

Grup 1CP					Grup 2CP				
ID	FeO ₂	FeCO ₂	FC	VRP	ID	FeO ₂	FeCO ₂	FC	VRP
1	-0.80	0.87	0.92	0.88	7	-0.26	-0.21	0.89	-0.21
2	-0.82	0.72	0.77	-0.66	8	-0.84	0.84	0.08	-0.05
3	-0.86	0.89	0.90	0.81	9	-0.35	0.44	0.83	0.87
4	-0.70	0.81	0.94	0.89	10	0.47	0.09	0.95	-0.96
5	-0.71	0.89	0.75	0.76	11	0.14	0.20	0.96	0.96
6	-0.70	0.87	0.92	0.84	12	0.03	0.50	0.96	0.96
					13	-0.06	0.84	0.98	0.98
					14	0.93	-0.94	-0.08	0.11
					15	0.23	0.39	0.96	0.95
Mitjana	-0.78*	0.87*	0.91	0.83	Mitjana	0.03*	0.39*	0.95	0.87
RIC	0.11	0.06	0.12	0.10	RIC	0.49	0.41	0.13	1.01

Nota: * $p < .05$; FeO₂: fracció d'O₂ exhalat; FeCO₂: fracció de CO₂ exhalat; FC: freqüència cardíaca; VRP: volum respiratori per minut.

Figura 5

Exemple de la transformació de les variables cardiorespiratòries a CP en els grups 1CP i 2CP. (a) Sèries temporals originals de les quatre variables cardiorespiratòries seleccionades en els dos grups durant les fases d'intensitat creixent i de recuperació. (b) Sèries temporals de les puntuacions de CP (valors z estandaritzats en l'espai inclòs pels CP) per als dos grups en les dues fases. Les sèries de quatre temps es van condensar en una o dues sèries temporals mitjançant la reducció de dimensió dels CP. Les línies blava i vermella representen la tendència mitjana dels dos CP, calculada mitjançant el mètode de mínims quadrats ponderats. Els punts de dades de l'eix x corresponen al nombre de mesuraments registrats durant la prova.



Projeccions ortogonals del CP₁ durant la fase de recuperació entre els grups 1CP i 2CP

La Taula 1 mostra que els participants del grup 1CP van presentar respostes fisiològiques relativament uniformes durant la fase de recuperació. En concret, tres variables cardiorespiratòries (FeCO₂, FC i VRP) van mostrar projeccions o valors positius elevats en el CP₁, mentre que FeO₂ va exhibir valors negatius. En concret, les projeccions de FeO₂ i FeCO₂ sobre el CP₁ van ser significativament més grans en el grup 1CP en comparació amb el grup 2CP (FeO₂: $U = 5.00$; $p < .01$; $d = 1.99$, FeCO₂: $d = 1.66$). En canvi, els participants del grup 2CP no van presentar projeccions cardiorespiratòries uniformes en CP₁.

La Figura 5 il·lustra les diferències entre els resultats dels grups 1CP i 2CP en la CCR. Durant la fase d'intensitat creixent, els dos grups van mostrar resultats similars, i les seves variables (FeCO₂, FC i VRP) van registrar un grau de colinealitat més gran amb CP₁, mentre que FeO₂ es va alinear majoritàriament amb CP₂. No obstant això, en la fase de recuperació, la variància de les quatre variables cardiorespiratòries en el grup 1CP estava encapsulada per un CP₁ singular, mentre que el grup 2CP mostrava tres variables (FeO₂ o FeCO₂, FC i VRP) amb CP₁ i FeCO₂ o FeO₂ amb CP₂.

Taula 2

Comparació dels valors finals de mitjana i rang interquartilic (RIC) de FC, VRP, VO₂ i RPE entre els grups.

Grup 1PC				
	FC (b·min ⁻¹)	VRP (l·min ⁻¹)	VO ₂ (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	RPE (escala de 6 a 20 de Borg)
Mediana	†107.00**	31.22*	12.15	6.00*
RIC	14.50	9.82	2.17	3.25
Grup 2CP				
	FC (b·min ⁻¹)	VRP (l·min ⁻¹)	VO ₂ (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	RPE (escala de 6 a 20 de Borg)
Mediana	†116.00**	40.72*	12.43	9.50*
RIC	24.00	26.20	3.99	6.13

Nota: † $p < .05$; d = efecte intermedi (*) i gran (**); FC = freqüència cardíaca; VRP = volum respiratori per minut; VO₂ = consum d'oxigen; RPE = percepció subjectiva de l'esforç.

Eficàcia de la recuperació psicobiològica i rendiment entre els grups 1CP i 2CP

La Taula 2 mostra els valors per als dos grups de FC, VRP, VO₂ i RPE al final de la fase de recuperació. En comparació amb el grup 2CP, el grup 1CP va presentar valors inferiors en totes les variables estudiades, amb diferències estadísticament significatives en la FC ($U = 7.50$; $p = .03$). Les mides dels efectes van indicar magnituds d'intermèdies a grans per a la FC, l'EV i la RPE ($d = 1.21$; $d = 0.57$; $d = 0.71$, respectivament). A més, la durada total de les proves realitzades pel grup 1CP (968.17 ± 179.66), incloses les fases d'intensitat creixent i de recuperació, va ser significativament més gran que la de les realitzades pel grup 2CP (848.22 ± 234.75) ($U = 0$; $p < .01$; $d = 0.56$).

Discussió

Les principals conclusions del present estudi van ser que: a) la CCR va augmentar durant la fase de recuperació d'una PECP piramidal; b) els participants amb 1CP en la fase de recuperació van mostrar valors propis del CP₁ més alts i una entropia informativa més baixa que els que tenien 2CP; i c) els valors de FC, VRP i RPE registrats al final de la PECP van ser més baixos en el grup 1CP en comparació amb el grup 2CP.

La reducció del nombre de CP i de l'entropia informativa durant la fase de recuperació (d'intensitat decreixent), en comparació amb la fase d'intensitat creixent de la prova piramidal, suggereix una CCR més eficient quan disminueix la càrrega de treball. Encara que això pugui semblar contradictori amb conclusions prèvies, que indicaven un deteriorament de la CCR després d'un esforç previ (Garcia-Retortillo et al., 2017), els resultats actuals es poden explicar per una implicació més gran del metabolisme anaeròbic durant la fase d'intensitat creixent en relació amb la fase de recuperació. Durant la fase d'intensitat creixent, la inèrcia del metabolisme aeròbic, contrarestatada per l'activació de les vies metabòliques làctiques, va produir hiperventilació (Binder et al., 2008; Molkov et al., 2014). És plausible que aquesta resposta, atribuïda a la producció de CO₂ no metabòlic, causés l'augment del nombre de CP durant la fase d'intensitat creixent, malgrat que es fessin les mateixes càrregues de treball en la fase de recuperació.

Montull et al. (2020) també van informar d'una falta de simetria en els valors cardiorespiratoris entre les fases d'intensitat creixent i de recuperació d'una prova d'exercici piramidal, amb valors més alts durant la recuperació (fase d'intensitat decreixent) per a la mateixa càrrega de treball. En canvi, la CCR d'aquest estudi va mostrar una eficàcia més gran durant la recuperació activa. Aquestes conclusions confirmen l'interès de complementar els resultats de les PECP actuals, com la reserva cardíaca i la capacitat cardiorespiratòria, amb paràmetres de CCR (és a dir, el nombre de CP i l'entropia informativa) (Garcia-Retortillo et al., 2017).

L'observació en el grup 1CP de més valors propis del CP₁ i d'una entropia informativa inferior durant la fase de recuperació, en comparació amb el grup 2CP, significa un nivell d'ordre, sincronització, eficiència i adaptabilitat en la resposta cardiorespiratòria més grans (Balagué et al., 2016; Garcia-Retortillo et al., 2017). Això implica un entrenament més gran intens de l'aparell cardiorespiratori i es pot estendre a altres processos fisiològics interrelacionats i integrats; per exemple, receptors quimiosensibles, sistema límbic-hipotalàmic, activitat simpàtica o parasimpàtica, o activitat muscular, que actuen en diferents escales temporals per garantir l'adaptació a la demanda de càrrega de treball (Garcia-Retortillo i Ivanov, 2022; Kairiukstiene et al., 2020; Pocock et al., 2013; Qammar et al., 2022; Velicka et al., 2019).

Durant la fase de recuperació, el grup 1CP va demostrar una covariació similar en les quatre variables cardiorespiratòries, amb valors de FeO₂ elevats que es correlacionaven inversament amb FeCO₂, FC i VRP. Aquesta elevació sostinguda de FeO₂, mentre altres variables es recuperaven, suggereix un retard en la resposta a la demanda d'oxigen (Bahr i Sejersted, 1991). Malgrat el retard esmentat, el grup 1CP no va formar un nou CP, probablement a causa del seu rendiment superior, que es va traduir en una freqüència inferior de valors cardiorespiratoris (és a dir, que afectava menys punts de dades) en comparació amb el grup 2CP (Balagué et al., 2016).

En canvi, alguns participants del grup 2CP van contribuir a la formació del CP₂ principalment a través de FeO₂, la qual cosa es deu probablement a una hiperventilació més gran en iniciar-se la fase de recuperació, fet que indica un intercanvi

de gasos menys eficient. Altres participants del grup 2CP van formar CP₂ a través de FeCO₂ i això suggereix que van ultrapassar el seu llindar anaeròbic ventilatori, que va donar lloc a una hiperventilació substancial induïda per l'excés de CO₂ no metabòlic (Binder et al., 2008; Molkov et al., 2014).

El grup 1CP va mostrar valors quantitatius més baixos de FC, VRP i RPE al final de la fase de recuperació en comparació amb el grup 2CP, malgrat que es va sotmetre a una prova de més durada, la qual cosa indica una tolerància a la càrrega de treball potencialment millor. Això suggereix que els participants amb un rendiment superior van demostrar no només una eficiència més gran, sinó també una eficàcia més gran en la recuperació de l'aparell cardiorespiratori durant les càrregues de treball piramidals. De fet, l'augment de l'entropia informativa en el grup 2CP posa de manifest possibles disfuncions als mecanismes de realimentació prospectiva i retrospectiva intervinguts pels quimiorceptors per regular la ventilació (Zebrowska et al., 2020). Aquesta ineficàcia pot contribuir a un deteriorament més pronunciat del control i la regulació de la funció cardiorespiratòria, la qual cosa en última instància condueix a un esgotament més precoç i a valors quantitatius més elevats de les variables psicobiològiques.

L'avaluació de la CCR durant la recuperació després de l'exercici mitjançant protocols piramidals té conseqüències clíniques rellevants en les PECP. Aquest èmfasi en l'avaluació de la recuperació després de l'exercici amb canvis graduals en les càrregues de treball comporta un punt de vista interessant sobre la regulació cardiorespiratòria posterior a l'exercici, ja que ofereix informació sobre l'estrès de la càrrega interna provocat per l'exercici previ (Bartels et al., 2018; Romero et al., 2017). L'aplicació de l'ACP i l'entropia informativa va demostrar clarament el potencial per informar sobre l'eficiència i l'eficàcia de l'aparell cardiorespiratori davant l'augment i la disminució de la càrrega de treball, fet que reforça aquestes mesures com una valuosa avaluació objectiva de l'aptitud cardiorespiratòria de les persones durant l'exercici (Balagué et al., 2016; Garcia-Retortillo et al., 2017). Aquest enfocament introdueix noves possibilitats per al diagnòstic i la predicció d'estats de salut i rendiment en les PECP, inclosa la identificació de trastorns fisiològics o patologies i, el que és més important, la prevenció d'aturades cardíques (Kairiukstiene et al., 2020; Velicka et al., 2019).

Les tècniques de compressió dimensional, com l'ACP, redueixen l'alta dimensionalitat de les dades de sèries temporals a uns quants components, la qual cosa permet conèixer de manera més completa les dinàmiques individuals (Denis, 2016). Aquest enfocament s'alinea amb la perspectiva que aquestes anàlisis són més integradores i realistes que els indicadors fisiològics tradicionals que es basen en valors quantitatius aïllats i estàtics (Balagué et al., 2020; Garcia-Retortillo et al., 2017). A més, es pot destacar que els exercicis piramidals a intensitat submàxima ofereixen una informació molt rellevant sobre l'estat de l'aparell cardiorespiratori i

permeten evitar les proves a intensitat màxima, les quals poden plantejar certs riscos, especialment per a les persones adultes i inactives.

Aquest treball va presentar certes limitacions metodològiques i perspectives de recerca futures. Els estrictes criteris d'inclusió, que restringien la mida de la mostra a persones adultes inactives i sanes, van limitar la significació estadística dels resultats. Per validar aquests resultats preliminars, es justifica la realització de futurs estudis que augmentin la mida de la mostra i investiguin diversos grups d'edat i diferents estats de salut i forma física. En segon lloc, tenint en compte que aquest estudi va determinar les càrregues de treball basant-se únicament en el RPE, els futurs estudis haurien d'afegir altres indicadors objectius com ara la FC, o bé càrregues de treball predeterminades. Finalment, els estudis que es duguin a terme en el futur haurien de considerar la incorporació de la tensió arterial sistòlica i diastòlica a l'ACP, juntament amb altres variables cardiorespiratòries per integrar més variables rellevants.

Per acabar, encara que l'ACP com a tècnica de dimensió lineal està validada com una eina valuosa i sensible per detectar canvis cardiorespiratoris durant les PECP (Garcia-Retortillo et al., 2017), s'han d'explorar altres tècniques d'anàlisi de dades per plasmar la dinàmica no lineal de la CCR. En aquest sentit, no només poden ser interessants els mètodes d'ACP no lineals (Tenenbaum et al., 2000), sinó també altres anàlisis promogudes per la fisiologia de xarxes de l'exercici (Garcia-Retortillo et al., 2020; Garcia-Retortillo i Ivanov, 2022; Garcia-Retortillo et al., 2024; Montull et al., 2023; Vázquez et al., 2016).

Conclusió

El present estudi va demostrar que la coordinació cardiorespiratòria en persones adultes sanes i inactives augmentava durant la recuperació després de l'exercici. Els participants amb un nombre inferior de components principals en aquesta fase van mostrar una eficiència de recuperació i una eficàcia més grans de l'aparell cardiorespiratori. Per tant, la coordinació cardiorespiratòria es reforça com una variable biològica valuosa per proporcionar informació integradora i sensible sobre les proves d'esforç cardiopulmonar i, en conseqüència, sobre la forma física. A més, el protocol d'exercici piramidal a intensitat submàxima sembla que és una eina adequada per avaluar persones adultes i identificar possibles desregulacions cardiorespiratòries.

Agraïments

Volem donar les gràcies als participants per la seva disposició a contribuir a aquest estudi. Així mateix, agraïm al Departament de Ciències Fisiològiques de la Universitat de Barcelona la seva ajuda en la recollida de dades.

Referències

- Bahr, R., & Sejersted, O. M. (1991). Effect of intensity of exercise on excess postexercise O₂ consumption. *Metabolism - Clinical and Experimental*, 40(8), 836–841. [https://doi.org/10.1016/0026-0495\(91\)90012-L](https://doi.org/10.1016/0026-0495(91)90012-L)
- Balady, G. J., Arena, R., Sietsema, K., Myers, J., Coke, L., Fletcher, G. F., Forman, D., Franklin, B., Guazzi, M., Gulati, M., Keteyian, S. J., Lavie, C. J., MacK, R., Mancini, D., & Milani, R. V. (2010). Clinician's Guide to Cardiopulmonary Exercise Testing in Adults. *Circulation*, 122(2), 191–225. <https://doi.org/10.1161/CIR.0B013E3181E52E69>
- Balagué, N., González, J., Javierre, C., Hristovski, R., Aragonés, D., Álamo, J., Niño, O., & Ventura, J. L. (2016). Cardiorespiratory coordination after training and detraining. A principal component analysis approach. *Frontiers in Physiology*, 7(35). <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00035>
- Balagué, N., Hristovski, R., Almaraz, M., Garcia-Retortillo, S., & Ivanov, P. C. (2020). Network Physiology of Exercise: Vision and Perspectives. *Frontiers in Physiology*, 11, 611550. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.611550>
- Bartels, R., Prodel, E., Laterza, M. C., de Lima, J. R. P., & Peçanha, T. (2018). Heart rate recovery fast-to-slow phase transition: Influence of physical fitness and exercise intensity. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, 23(3), 1–7. <https://doi.org/10.1111/anec.12521>
- Binder, R. K., Wonisch, M., Corra, U., Cohen-Solal, A., Vanhees, L., Saner, H., & Schmid, J. P. (2008). Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing. In *European Journal of Preventive Cardiology* (Vol. 15, Issue 6, pp. 726–734). <https://doi.org/10.1097/HJR.0b013e328304fed4>
- Cohen, J. (1988). Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Denis, D. J. (2016). *Applied Univariate, Bivariate, And Multivariate Statistics*. Wiley.
- Esquius, L., Garcia-Retortillo, S., Balagué, N., Hristovski, R., & Javierre, C. (2022). Physiological-and performance-related effects of acute olive oil supplementation at moderate exercise intensity. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0279-6>
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175–191. <https://doi.org/10.3758/bf03193146>
- Garcia-Retortillo, S., Abenza, Ó., Vasileva, F., Balagué, N., Hristovski, R., Wells, A., Fanning, J., Kattula, J., & Ivanov, P. C. (2024). Age-related breakdown in networks of inter-muscular coordination. *GeroScience*, 1–25. <https://doi.org/10.1007/s11357-024-01331-9>
- Garcia-Retortillo, S., Gacto, M., O'Leary, T. J., Noon, M., Hristovski, R., Balagué, N., & Morris, M. G. (2019). Cardiorespiratory coordination reveals training-specific physiological adaptations. *European Journal of Applied Physiology*, 119(8), 1701–1709. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04160-3>
- Garcia-Retortillo, S., & Ivanov, P. C. (2022). Inter-muscular networks of synchronous muscle fiber activation. *Frontiers in Network Physiology*, 2, 1059793. <https://doi.org/10.3389/fnetp.2022.1059793>
- Garcia-Retortillo, S., Javierre, C., Hristovski, R., Ventura, J. L., & Balagué, N. (2017). Cardiorespiratory coordination in repeated maximal exercise. *Frontiers in Physiology*, 8(387). <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00387>
- Garcia-Retortillo, S., Javierre, C., Hristovski, R., Ventura, J. L., & Balagué, N. (2019). Principal component analysis as a novel approach for cardiorespiratory exercise testing evaluation. *Physiological Measurement*, 40(8), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/AB2CA0>
- Garcia-Retortillo, S., Rizzo, R., Wang, J. W. J. L., Sitges, C., & Ivanov, P. C. (2020). Universal spectral profile and dynamic evolution of muscle activation: a hallmark of muscle type and physiological state. *Journal of Applied Physiology*, 129(3), 419–441. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00385.2020>
- Gunnar Borg. (1998). Borg's perceived exertion and pain scales. *Human Kinetics*.
- Haken, H. (2000). *Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-33023-2>
- Jolliffe, I. (2002). *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/B98835>
- Kairiukstiene, Z., Poderiene, K., Velicka, D., Trinkunas, E., & Poderys, J. (2020). Analysis of ECG parameter dynamics which define fatigue and the functional state of athletes. *Medicina Dello Sport*, 73(1), 32–41. <https://doi.org/10.23736/S0025-7826.20.03515-2>
- Krivoshchekov, S. G., Uryumtsev, D. Y., Gulyaeva, V. V., & Zinchenko, M. I. (2021). Cardiorespiratory Coordination in Acute Hypoxia in Runners. *Human Physiology*, 47(4), 80–90. <https://doi.org/10.1134/S0362119721030087>
- Meglen, R. R. (1991). Examining large databases: A chemometric approach using principal component analysis. *Journal of Chemometrics*, 5(3), 163–179. <https://doi.org/10.1002/CEM.1180050305>
- Molkov, Y., Zoccal, D., Baek, D., Abdala, A., Machado, B., Dick, T., Paton, J., & Rybak, I. (2014). Physiological and pathophysiological interactions between the respiratory central pattern generator and the sympathetic nervous system. *Progress in Brain Research*, 121(1), 1–23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63488-7.00001-X>
- Montull, L., Abenza, O., Hristovski, R., & Balagué, N. (2023). Hysteresis Area of Psychobiological Variables. A New Non-Invasive Biomarker of Effort Accumulation? *Apunts Educación Física y Deportes*, 152, 55–61. [https://doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.\(2023/2\).152.06](https://doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.(2023/2).152.06)
- Montull, L., Vázquez, P., Hristovski, R., & Balagué, N. (2020). Hysteresis behaviour of psychobiological variables during exercise. *Psychology of Sport and Exercise*, 48(August 2019), 101647. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2020.101647>
- Naudts, J. (2005). Boltzmann entropy and the microcanonical ensemble. *Europhysics Letters*, 69(5), 719–724. <https://doi.org/10.1209/epl/i2004-10413-1>
- Oviedo, G. R., Garcia-Retortillo, S., Carbó-Carreté, M., Guerra-Balic, M., Balagué, N., Javierre, C., & Guàrdia-Olmos, J. (2021). Cardiorespiratory Coordination During Exercise in Adults With Down Syndrome. *Frontiers in Physiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.704062>
- Pocock, G., Richards, C. D., & Richards, D. A. (2013). *Human Physiology*. Springer Science & Business Media.
- Qammar, N. W., Orinaitė, U., Šiaučiūnaitė, V., Vainoras, A., Šakalytė, G., & Ragulskis, M. (2022). The Complexity of the Arterial Blood Pressure Regulation during the Stress Test. *Diagnostics*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/diagnostics12051256>
- Romero, S. A., Minson, C. T., & Halliwill, X. R. (2017). The cardiovascular system after exercise. *Journal of Applied Physiology*, 122(4), 925–932. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00802.2016>
- Seely, A. J. E., & Macklem, P. (2012). Fractal variability: An emergent property of complex dissipative systems. *Chaos*, 22(1), 19–22. <https://doi.org/10.1063/1.3675622>
- Tenenbaum, J. B., De Silva, V., & Langford, J. C. (2000). A Global Geometric Framework for Nonlinear Dimensionality Reduction. *Science*, 290(5500), 2319–2323. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.290.5500.2319>
- Vázquez, P., Hristovski, R., & Balagué, N. (2016). The path to exhaustion: Time-variability properties of coordinative variables during continuous exercise. *Frontiers in Physiology*, 7, 37. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00037>
- Velicka, D., Kairiukstiene, Z., Poderiene, K., Vainoras, A., & Poderys, J. (2019). Interaction between cardiac functional indices during incremental exercise test reveals the peculiarities of adaptation to exercising. *Medicina (Lithuania)*, 55(7), 1–9. <https://doi.org/10.3390/medicina55070314>
- Zebrowska, M., Garcia-Retortillo, S., Sikorski, K., Balagué, N., Hristovski, R., Casimiro, J., & Petelczyc, M. (2020). Decreased coupling among respiratory variables with effort accumulation. *Europhysics Letters*, 132(2), 1–7. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/132/28001>

Conflicte d'interessos: les autories no han comunicat cap conflicte d'interessos.



© Copyright Generalitat de Catalunya (INEFC). Aquest article està disponible a l'URL <https://www.revista-apunts.com/ca/>. Aquest treball està publicat sota una llicència Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. Les imatges o qualsevol altre material de tercers d'aquest article estan inclosos a la llicència Creative Commons de l'article, tret que s'indiqui el contrari a la línia de crèdit; si el material no s'inclou sota la llicència Creative Commons, els usuaris hauran d'obtenir el permís del titular de la llicència per reproduir el material. Per veure una còpia d'aquesta llicència, visiteu <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ca>