

# TREBALL FINAL DE GRAU

Grau en Ciències de l'Activitat Física i de l'Esport

Escola Universitària de la Salut i l'Esport (EUSES), Centre adscrit a la Universitat de Girona

---

## RESPOSTA DE LES VARIABLES I LA COORDINACIÓ CARDIOVASCULAR EN LA RECUPERACIÓ D'UN EXERCICI INTERVÀL·LIC D'ALTA INTENSITAT

---

Paula Gutiérrez Crespí

Curs acadèmic: 2022-2023

Tutor/a de l'EUSES: Iker García Alday

Data d'entrega: 01/06/2023

# ÍNDIX

---

|   |    |
|---|----|
| RESUM .....   | 1  |
| INTRODUCCIÓ.....  | 2  |
| METODOLOGIA.....  | 5  |
| 1. <i>Participants</i> .....                                | 5  |
| 2. <i>Disseny de l'estudi</i> .....                         | 5  |
| 3. <i>Procediments</i> .....                                | 6  |
| 3.1. <i>Protocol d'exercici</i> .....                       | 6  |
| 3.2. <i>Variables recollides</i> .....                      | 6  |
| 4. <i>Anàlisi estadístic</i> .....                          | 7  |
| 5. <i>Consideracions ètiques</i> .....                      | 7  |
| RESULTATS .....   | 9  |
| DISCUSIÓ .....  | 14 |
| 1. <i>Valoració de les hipòtesis</i> .....                  | 14 |
| 2. <i>Adaptacions dels paràmetres cardiovasculars</i> ..... | 15 |
| 3. <i>Coordinació cardiovascular</i> .....                  | 17 |
| 4. <i>Limitacions i línies d'investigació futures</i> ..... | 20 |
| CONCLUSIÓ.....  | 21 |
| AGRAÏMENTS.....   | 22 |
| BIBLIOGRAFIA.....   | 23 |
| ANNEXES .....   | 29 |

## RESUM

---

L'entrenament intervàl·lic d'alta intensitat (HIIT) és un tipus d'entrenament que ha demostrat generar un gran nombre d'adaptacions i millores en totes les capacitats fisiològiques. Per desenvolupar aquests ajustos i afavorir el rendiment dels esportistes és important controlar les càrregues i monitorar-les, ja que un nombre elevat de les adaptacions ocorren en els períodes de recuperació. En els darrers anys, s'ha vist que la fisiologia clàssica presenta diverses limitacions, per la qual cosa és necessari tenir en compte la branca de la fisiologia que estudia la connectivitat entre els sistemes, coneguda com a Network Physiology of Exercise. En el present estudi, ens centrarem en les variables cardiovasculars, analitzant en 16 participants com evolucionen certs paràmetres i es coordinen, a través de l'anàlisi de components principals, durant els 30 minuts posteriors a la realització d'un HIIT. Pel que fa a l'evolució dels paràmetres en el temps, s'han observat diferències entre el desenvolupament de la freqüència cardíaca i el volum sistòlic, els quals presenten a l'hora un patró diferent amb les variables de la pressió arterial sistòlica, pressió arterial diastòlica, la resistència vascular perifèrica i la fracció  $dP/dt$ . Quant a la coordinació destaca una disminució dràstica de la connectivitat de les xarxes en els primers 5 minuts que, posteriorment augmenta respecte a l'estat basal i una tendència a presentar canvis en les variables coordinatives abans que en les variables clàssiques. En conclusió, és necessari augmentar el marge d'estudi i tenir en compte la fisiologia de les xarxes, per a complementar la fisiologia clàssica i aconseguir una major resolució quant a la monitorització de la càrrega.

**Paraules clau:** entrenament d'alta intensitat, coordinació cardiovascular, sistema cardiovascular, recuperació esportiva, fisiologia de les xarxes.

## INTRODUCCIÓ

---

L'entrenament intermitent d'alta intensitat (d'ara endavant HIIT, segons les sigles de l'anglès *High Intensity Interval Training*) és un entrenament basat en sessions d'interval curts que alternen esforç d'intensitat màxima o submàxima amb períodes de recuperació, siguin actius o passius. Aquest mètode d'entrenament ha agafat molta popularitat, ja que ha demostrat millorar la salut i la capacitat de rendiment atlètic (Gibala et al., 2013; MacInnis et al. 2017), aconseguint beneficis a curt termini a nivell cardiorespiratori i metabòlic, tant en atletes de rendiment com en població general.

Quan la pràctica esportiva es realitza regularment i en uns volums i intensitats adequades es produeixen modificacions i adaptacions en capacitats fisiològiques, tant de caràcter cardiovascular, com metabòlic, muscular, glucolític, entre d'altres (Chicharro, 2008). Per això, diversos factors, entre els quals trobem: la intensitat, duració del treball, modalitat esportiva, nombre d'interval, patrons de duració i activitat durant la recuperació (Buchheit et. al, 2013) es relacionen entre si, provocant un gran nombre de millores adaptatives. A més, l'entrenament d'alta intensitat proporciona múltiples beneficis en l'increment del consum màxim d'oxigen i la capacitat aeròbica (McArdle & Katch, 2006). Podem dir, doncs, que el HIIT produeix canvis i efectes fisiològics en tot l'organisme, inclosos a nivell central (Burgomaster et. al, 2008) i directes sobre el rendiment de l'esportista.

Al mateix temps, però, quan es realitzen entrenaments d'alta intensitat es donen una sèrie de condicions que afavoreixen l'aparició de la fatiga en l'esportista. Val a dir, que la fatiga és un procés complex que abasta tots els nivells de l'activitat de l'organisme i que es manifesta en el conjunt de canvis relacionats amb les transformacions de l'homeòstasi, els sistemes reguladors (vegetatiu i executiu), com en el desenvolupament del sentit del cansament, i la disminució temporal de la capacitat del treball (Platonov, 2007). Concretament a l'esport, implica una disminució de la capacitat de rendiment com a reacció a les càrregues, és a dir, davant la fatiga es produeix un deteriorament del rendiment (Kellmann et al., 2018; Gandevia, 2001).

La base fonamental per a una organització adequada de la càrrega d'entrenament és la unitat entre la càrrega, que provoca una certa fatiga, i els mitjans de recuperació

(generals o específics). Així, entenem la recuperació, com el conjunt d'estratègies o recursos aplicats a nivell fisiològic i/o psicològic amb l'objectiu de disminuir i compensar la fatiga (Kellmann et al., 2018). En àmbits com el rendiment esportiu, una recuperació òptima ajuda a maximitzar el rendiment, minimitzar el risc de lesió i executar les sessions amb qualitat (Argus et al., 2013).

De la quantitat d'adaptacions que es generen amb la realització de sessions d'entrenaments HIIT és important entendre que gran part d'aquestes no es donen durant l'entrenament sinó en el període de recuperació (Batacan, 2017; Meade, 2018); motiu pel qual, és important entendre tots els paràmetres i programar les sessions a partir de la quantificació de càrregues i temps de descans dels diferents òrgans i sistemes per tornar a l'homeòstasi.

En aquest sentit, ens centrarem en les adaptacions cardiovasculars, que són de gran importància per la millora del rendiment físic, ja que tenen un paper fonamental en la millora del  $VO_{2m\grave{a}x}$  i en la capacitat per produir energia, i per tant oxigen, de manera perllongada (Batacan et al., 2017). Entre les principals adaptacions que ocorren cal destacar: l'augment de la cavitat cardíaca; l'enfortiment de la paret del miocardi, especialment el ventricle esquerre, i la disminució de la freqüència cardíaca; així com un increment d'hematies en sang i una millora de la capacitat de transport de l'oxigen (Villalón et al., 2016).

Per tal de conèixer les adaptacions que es donen durant l'entrenament HIIT (Hellsten et al., 2015), sovint s'estudien diversos paràmetres cardíacs com: la freqüència cardíaca (FC), les pressions arterials sistòlica (PAS) i diastòlica (PAD) (Inglés et al., 2016), i el volum sistòlic (VS); però també és rellevant amplificar l'estudi i tenir en compte els paràmetres circulatoris com: la resistència vascular perifèrica (RVP) i la fracció  $dP/dt$  (Álvarez et al., 1997; Migliore & Darú, 2011), ja que a través d'aquests es poden generar adaptacions cardiovasculars que ocorren específicament durant els períodes de recuperació (Annex 1).

L'estudi dels paràmetres cardiovasculars prèviament descrits i la seva relació amb la recuperació esportiva es poden analitzar no tan sols des de la perspectiva clàssica, sinó que també des del prisma integrador de la fisiologia de les xarxes.

La coordinació cardiovascular (CCV) és l'acoblament del sistema cardíac i vascular formant xarxes espaciotemporals horitzontals i integrant-se entre si; en aquest cas, durant la pràctica d'exercici físic. Aquesta coordinació permet optimitzar l'energia i el funcionament global de l'organisme (Martínez et al., 2017). Els sistemes fisiològics durant l'exercici es coordinen i treballen de forma eficaç per obtenir un correcte rendiment, però amb l'aparició de la fatiga aquesta coordinació es podria veure afectada provocant la creació de noves connexions i/o l'eliminació i transformació d'unes altres (Annex 2).

En l'àmbit cardíac sabem com varien els paràmetres amb l'alta intensitat individualment, però ens falta conèixer com es coordinen aquests entre si i el temps de recuperació necessari per reprendre una coordinació adequada entre paràmetres; per tal de poder quantificar i modificar la càrrega evitant arribar a un excés de fatiga i sobreentrenament. Així doncs, aquest estudi neix arran del nou paradigma que està creixent de forma exponencial en el camp de la fisiologia de l'esport (Balagué et al., 2020), conegut com a Network Physiology of Exercise o fisiologia de xarxes de l'exercici (NPE) (Annex 3).

L'objectiu principal d'aquest treball de final de grau és valorar i quantificar quin efecte té la càrrega d'entrenament de màxima intensitat, a escala global. Per això, es vol conèixer la resposta de les variables cardiovasculars i la seva coordinació després de 30 minuts de la realització d'un HIIT, per ser el més eficaç i eficient possible.

Per concloure, cal esmentar que la hipòtesi principal del present estudi consisteix en el fet que la coordinació cardiovascular disminueixi just després de la realització de l'entrenament HIIT d'intensitat màxima, i després augmenti progressivament durant els primers 30 minuts de recuperació.

I com a hipòtesi secundària trobem l'anàlisi dels paràmetres cardiovasculars en el temps de recuperació, on s'espera que paràmetres cardíacs com el VS i la FC tinguin un comportament de recuperació diferent als paràmetres de pressió arterial com la PAS i la PAD o els paràmetres de control vasomotors, el RVP i la fracció  $dP/dt$ .

## **METODOLOGIA**

---

### **1. Participants**

Setze subjectes (set dones i nou homes) van formar part de l'estudi (edat:  $27,8 \pm 9,1$  anys, alçada:  $175,8 \pm 9,5$  cm, massa corporal:  $68,8 \pm 11,4$  kg).

Tots els participants que es varen reclutar estaven sans i entrenats, a més d'estar habituats a entrenaments intervàl·lics d'alta intensitat, mínim tres cops per setmana. Així mateix, no patien cap contraindicació mèdica a l'esforç d'alta intensitat.

A cadascú d'ells se li va lliurar un consentiment informat per escrit abans de participar en l'estudi i van poder retirar-se lliurement del protocol experimental en qualsevol moment.

### **2. Disseny de l'estudi**

Aquest estudi utilitza un disseny de tipus observacional, en què es comparen diferents franges temporals en la fase de recuperació de setze participants que es varen sotmetre a una sessió d'entrenament de tipus HIIT.

Els subjectes es van presentar al laboratori de la Universitat de Barcelona per a completar l'estudi. Es va indicar als participants que arribessin en un estat reposat, de normo hidratació i postprandial ( $> 2$  hores), havent-se abstingut de cafeïna, alcohol i exercici intens durant les 24 hores anteriors a una sessió. També se'ls va aconsellar mantenir hàbits dietètics habituals al llarg de l'estudi.

En primer lloc, es va fer una anàlisi basal de cada participant, amb una durada aproximada de 10 minuts, per tal d'obtenir dades bàsiques com alçada, pes i IMC i tots els paràmetres cardiovasculars necessaris. Una vegada aconseguides les dades, es passava a dur a terme un escalfament de 10' per ja iniciar la sessió HIIT (especificada en l'apartat 3.1. Protocol d'exercici). Finalment, els participants tenien un període de recuperació de 30 minuts, en el qual estaven monitoritzats, per observar les variacions en les variables cardiovasculars durant aquest temps.

Per a la recopilació de dades, el subjecte es col·locava sobre una llitera en decúbit supí per a recollir les dades de variables cardiovasculars. El període de presa de dades basal tenia una durada de 10 minuts per assegurar l'obtenció de suficients dades cardiovasculars per la posterior anàlisi.

Just en finalitzar l'exercici, es col·locava a la llitera de nou per obtenir els paràmetres cardiovasculars a tots els participants. Al cap de 5 minuts exactes de finalitzar l'exercici començaven els 30 minuts de recuperació (en la mateixa posició que l'anterior presa de dades), en els quals el subjecte descansava en un ambient tranquil, en silenci i sense interaccions amb el personal investigador.

### **3. Procediments**

#### **3.1. Protocol d'exercici**

En primer lloc, el subjecte realitzava un escalfament en un cicloergòmetre amb resistència aèria, format per: 5 minuts a 1 W/kg, 3 minuts a 1,5 W/kg i 2 minuts a 2 W/kg. Durant l'escalfament, la cadència va ser autoseleccionada i es va ajustar l'altura del selló segons la comoditat del subjecte (altura que es mantindria idèntica durant l'exercici). Al cap d'1 minut de finalitzar l'escalfament s'iniciava el protocol HIIT, basat en 8 repeticions de 20 segons al màxim esforç possible amb períodes de recuperació passiva d'1 minut, és a dir, sense pedalar ni baixar del cicloergòmetre. Durant les 8 repeticions únicament es mostrava al subjecte el temps transcorregut, sense conèixer paràmetres mecànics com la cadència o la potència aplicada. L'única instrucció que rebien tots els participants era realitzar la prova al màxim esforç possible.

En finalitzar l'exercici, el subjecte es dirigia immediatament a la llitera per iniciar els 30 minuts de recuperació i fer les valoracions posteriors a l'exercici, és a dir, no feia fase de tornada a la calma.

#### **3.2. Variables recollides**

Es van recollir diverses variables, com són: freqüència cardíaca (FC), volum sistòlic (VS), pressió arterial sistòlica (PAS), pressió arterial diastòlica (PAD), resistència vascular perifèrica (RVP) i fracció dP/dT, segon a segon al llarg de la sessió de recuperació.

Els paràmetres cardiovasculars van ser enregistrats mitjançant l'aparell Nexfin<sup>®</sup> (BMEYE B.V., Amsterdam, Països Baixos), que és en un maneguet de dit a partir del qual, mesurant la pressió exercida sobre aquest, s'efectua un seguiment continu (batec a batec) dels paràmetres. L'aparell va ser validat per, a partir de la pressió arterial del dit i un algoritme, obtenir els valors que s'obtidrien a nivell intraarterial radial, amb una



extrapolació estable a canvis hemodinàmics. L'aparell permet el seguiment continu de paràmetres com la FC, el VS, la RVP i el dP/dt, entre d'altres.

Aquestes variables es varen valorar en agrupacions d'estat basal previ a l'exercici (durant 5 minuts) i durant el període de 30 minuts de recuperació del subjecte després de l'exercici, en tres franges temporals ben diferenciades, els primers cinc minuts de la recuperació (0-5'), cinc minuts intermedis (15-20') i els últims cinc minuts (25-30').

#### **4. Anàlisi estadístic**

Per a elaborar l'anàlisi estadístic de dades es va emprar el programa IBM SPSS Statistics (versió 29.1), a partir de tècniques de reducció de la dimensionalitat com la selecció de les variables quantitatives i l'anàlisi de components principals (PCA).

Les variables cardiovasculars utilitzades es van obtenir batec a batec. Per analitzar la coordinació cardiovascular en cada subjecte, es va realitzar la reducció de dimensions amb la cerca de components principals sobre les següents variables seleccionades: FC, PAS, PAD, VS, RVP i fracció dP/dT. Es varen excloure gran nombre de dades, com és el cas de la despesa cardíaca, ja que tenen relacions matemàtiques amb les variables ja seleccionades. Hi ha diverses proves sobre l'ús de la reducció de dimensionalitat per PCA en mostres poblacionals petites, la qual cosa indica certa robustesa (Jolicoeur,1984).

Per determinar el nombre de PC es va fer servir el criteri de Kaiser-Gutmann i, per tant, es consideren que els PC amb valors propis  $\lambda \geq 1,00$  són significatius (Jolliffe, 2002). Atès que el primer PC (PC1) sempre conté la proporció més alta de la variància de dades, els valors propis de PC1 es van comparar entre grups mitjançant la prova U de Mann-Whitney. A més, per comprovar que les variables estaven relacionades i eren adequades per la detecció d'estructures es va fer servir la prova de KMO i Bartlett.

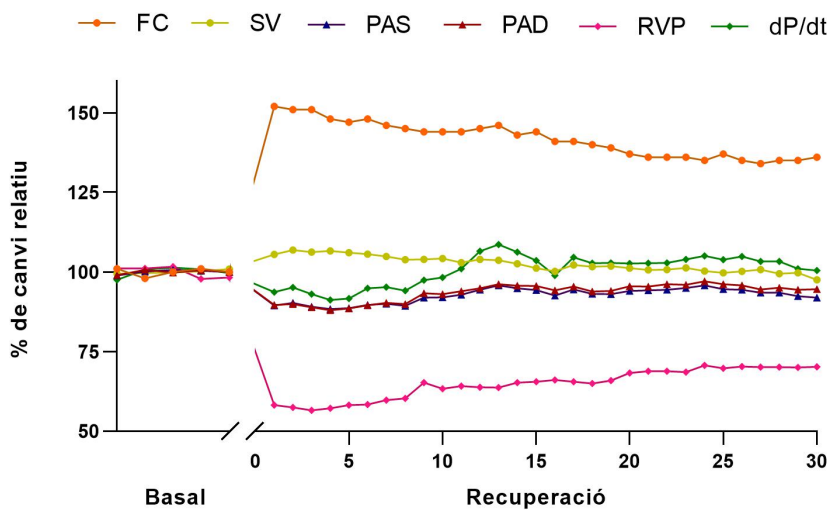
#### **5. Consideracions ètiques**

La realització de l'estudi va ser aprovada per part del Comitè d'Ètica Institucional de la Universitat de Barcelona (Comissió de Revisió Institucional núm. IRB00003099) per assegurar que l'estudi complís els criteris ètics, metodològics i legals.

Així mateix, la realització del present projecte ha seguit la normativa de bona pràctica per investigacions amb éssers humans i els principis enunciats a la Declaració de Hèlsinki (Associació Mèdica Mundial, 1989). S'informà, degudament, als participants i se sol·licità, a cadascú, el consentiment informat, per escrit (Annex 12). Posteriorment, les dades varen ser recollides i tractades amb totes les garanties de confidencialitat, d'acord amb el que disposa la Llei Orgànica 15/1999, del 13 de desembre, sobre la protecció de dades de caràcter personal, garantint l'absolut anonimat i secret d'acord amb la Llei de Secret Estadístic 12/1989 del 9 de maig.

## RESULTATS

En el present estudi es comparen diverses franges de temps després de la realització d'un HIIT, concretament en els posteriors 30 minuts de recuperació, com són: primera fase de recuperació (minut 0 – minut 5), segona fase o mitja (minut 15 – minut 20) i fase final (minut 25 – minut 30), tot comparant també amb l'estat basal (abans de l'inici de la prova).



**Figura 1.** Sèries temporals de les variables cardiovasculars seleccionades per l'estudi de la recuperació després del HIIT.

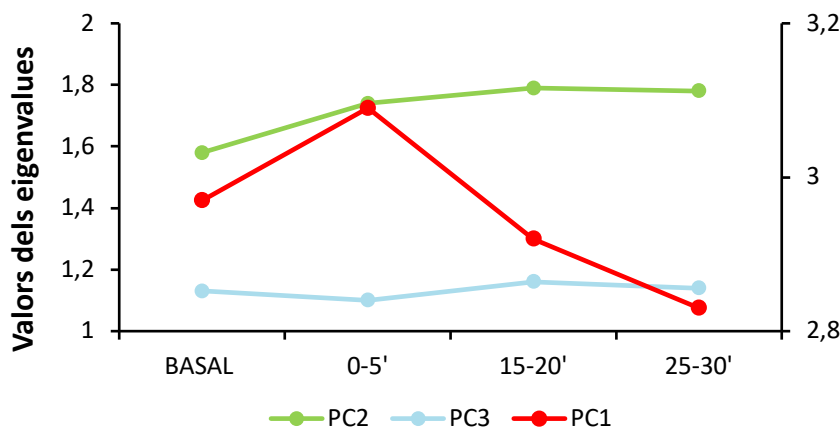
La Figura 1 i Taula 1 mostren les característiques descriptives dels participants, respecte a l'evolució dels paràmetres cardiovasculars en les diferents fases de recuperació. Al llarg dels 30 minuts posteriors a l'exercici, la FC va ser superior respecte al basal, però es va mantenir amb uns valors molt semblants i progressivament descendents durant les tres fases de recuperació (Figura 1). En el VS s'observà un petit creixement durant els primers 5 minuts de recuperació, però en general no hi va haver variacions en cap fase. Paral·lelament, es va veure una disminució de la pressió sistòlica i diastòlica en els primers 5 minuts de recuperació, amb una afectació major sobre la pressió sistòlica, en la qual es veia un descens major envers la pressió diastòlica, que es mantenia més constant (Taula 1). Pel que fa a la RVP, es va produir una disminució dràstica després del HIIT, mantenint-se en els moments posteriors. Finalment, en el cas del dP/dt, es va observar la mateixa tendència que seguia la RVP, però amb un descens

menys marcat i una major recuperació d'aquest paràmetre al llarg dels 30 minuts de recuperació.

**Taula 1.** Evolució dels paràmetres cardiovasculars en el temps

| Paràmetres CV | FC      | PAS      | PAD     | VS       | RVP        | dP/dt      |
|---------------|---------|----------|---------|----------|------------|------------|
| Basal         | 66 ± 15 | 128 ± 19 | 74 ± 11 | 100 ± 19 | 1512 ± 891 | 1070 ± 409 |
| 0 – 5'        | 89 ± 16 | 117 ± 26 | 67 ± 14 | 107 ± 24 | 813 ± 479  | 895 ± 296  |
| 15 – 20'      | 85 ± 15 | 121 ± 27 | 69 ± 14 | 104 ± 21 | 890 ± 479  | 974 ± 297  |
| 25 – 30'      | 83 ± 14 | 120 ± 25 | 69 ± 12 | 102 ± 21 | 917 ± 446  | 990 ± 288  |

*Nota.* Els valors s'expressen com a mitjana ± desviació estàndard de la mitjana. CV, cardiovasculars; FC, freqüència cardíaca; PAS, tensió arterial sistòlica; PAD, tensió arterial diastòlica; VS, volum sistòlic; RVP, resistència vascular perifèrica; dP/dt, fracció dP/dt.



**Figura 2.** Sèries temporals de les puntuacions de PC. Un exemple típic de la formació de sèries temporals de variables de coordinació, expressades mitjançant components principals a partir de variables cardiovasculars.

Quant a la coordinació cardiovascular, el nombre de components principals depèn de la variància de dades, i en aquest cas, varen ser capturats entre dos i tres PC al llarg de la recuperació. A la Figura 2 podem veure com els valors propis de PC1, que representen la proporció més gran de variància de les dades, varen ser més alts en els primers 5 minuts de recuperació (amb un valor de  $3,09 \pm 0,48$ ) que en la resta de seccions temporals (Taula 2). En canvi, en el component principal 2 (PC2) s'observa un increment en la proporció de variància de dades en la fase de recuperació en

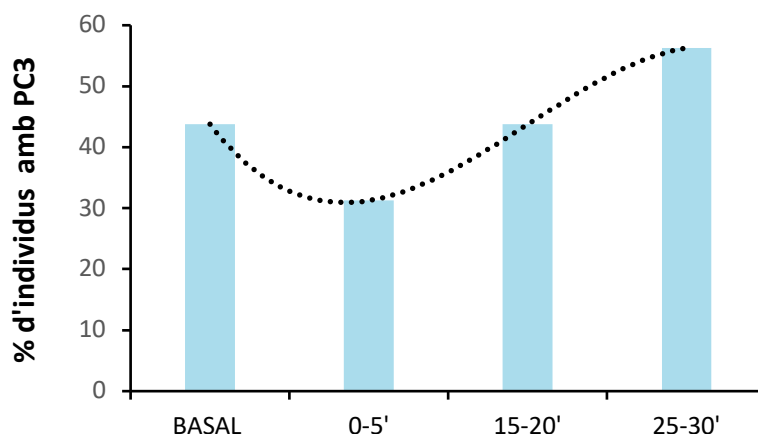
contraposició a l'estat basal, especialment en els dos últims salts temporals (minut 15 – 20 = 1,79 i minut 25-30 = 1,78); i el PC3 es manté bastant estable en cada secció tinguda en compte.

**Taula 2.** Valors propis de PC1 i percentatge de participants amb dos PC (PC2) i tres PC (PC3) en cada salt temporal.

|                       | Eigenvalues (PC1) | % 2PCs | %3PCs |
|-----------------------|-------------------|--------|-------|
| <b>Estat basal</b>    | 2,97 (0,40)       | 56,25  | 43,75 |
| <b>Minut 0 – 5'</b>   | 3,09 (0,48)       | 68,75  | 31,25 |
| <b>Minut 15 – 20'</b> | 2,92 (0,32)       | 56,25  | 43,75 |
| <b>Minut 25 – 30'</b> | 2,83 (0,38)       | 43,75  | 56,25 |

*Nota.* PC1, primer component principal, on els valors s'expressen com a mitjana (desviació estàndard); % 2PC, percentatge de participants amb dos components principals (PC); % 3PC, percentatge de participants amb tres components principals.

En general, els components principals 1 i 2 (que es descriuran en més detall a continuació), estan presents en tots els individus estudiats, és a dir, mínim tots presenten 2 PC, però el tercer component varia segons l'individu i el salt de temps en què es troba. També, és interessant observar que pel PC1, el valor de l'eigenvalue varia, sent el valor més elevat durant la secció temporal dels minuts 0 – 5 de recuperació; en canvi, en les fases finals de la recuperació, s'inverteix i els PC2 i PC3 agafen major força.



**Figura 3.** Variacions en el percentatge d'individus de la mostra que presenten 3 PC en cada salt temporal.

En l'estat basal un 56,25% dels participants varen presentar dos components principals i la resta (43,75%) tres components. Després de la realització del HIIT, aquests valors es varen veure afectats; així doncs, el percentatge d'individus amb dos components principals va augmentar significativament a un 68,75% en comparació amb el nombre de 3 PC que va disminuir en un 12,5%, fins a arribar a un 31,25%. Per tant, podem dir que la coordinació en el minut 0 – 5' va disminuir de forma significativa, a causa de la fatiga.

En canvi, durant els 30 minuts de recuperació podem veure com aquesta coordinació es va recuperant (Figura 3), i en contraposició a l'esperat, el nombre d'individus amb tres components principals incrementa, i inclús acaba superant el percentatge d'individus amb 3 PC durant estat basal, arribant així a un 56,25%, el que suposa que 9 dels 16 participants acaben el període de 30 minuts de recuperació amb un major nombre de components principals que abans de realitzar l'exercici o mínim amb el mateix nombre de PC que en estat basal (14/16).

**Taula 3.** Càrregues de les variables cardiovasculars seleccionades a PC1.

|               | <b>FC</b>    | <b>PAS</b>   | <b>PAD</b>   | <b>VS</b>     | <b>RVP</b>   | <b>dP/dt</b> |
|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| <b>Basal</b>  | -0,11 (0,46) | 0,762 (0,30) | 0,374 (0,68) | 0,187 (0,74)  | 0,054 (0,65) | 0,729 (0,18) |
| <b>0-5'</b>   | 0,210 (0,44) | 0,829 (0,23) | 0,745 (0,35) | 0,099 (0,63)  | 0,316 (0,56) | 0,741 (0,36) |
| <b>15-20'</b> | 0,088 (0,40) | 0,879 (0,13) | 0,847 (0,19) | -0,135 (0,55) | 0,498 (0,47) | 0,634 (0,26) |
| <b>25-30'</b> | -0,04 (0,41) | 0,896 (0,11) | 0,838 (0,17) | -0,023 (0,52) | 0,437 (0,50) | 0,582 (0,35) |

*Nota. Els valors s'expressen com a mitjana (desviació estàndard).*

**Taula 4.** Càrregues de les variables cardiovasculars seleccionades a PC2.

|               | <b>FC</b>    | <b>PAS</b>   | <b>PAD</b>    | <b>VS</b>    | <b>RVP</b>    | <b>dP/dt</b> |
|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| <b>Basal</b>  | -0,12 (0,45) | 0,339 (0,33) | 0,221 (0,43)  | 0,250 (0,51) | -0,063 (0,62) | 0,382 (0,35) |
| <b>0-5'</b>   | 0,062 (0,40) | 0,335 (0,33) | 0,210 (0,43)  | 0,316 (0,65) | -0,063 (0,70) | 0,316 (0,30) |
| <b>15-20'</b> | -0,00 (0,38) | 0,345 (0,22) | 0,105 (0,40)  | 0,442 (0,60) | -0,161 (0,65) | 0,509 (0,35) |
| <b>25-30'</b> | 0,023 (0,45) | 0,307 (0,21) | -0,001 (0,43) | 0,515 (0,65) | -0,309 (0,70) | 0,434 (0,30) |

*Nota. Els valors s'expressen com a mitjana (desviació estàndard).*

**Taula 5.** Càrregues de les variables cardiovasculars seleccionades a PC3.

|               | <b>FC</b>    | <b>PAS</b>   | <b>PAD</b>   | <b>VS</b>     | <b>RVP</b>    | <b>dP/dt</b> |
|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| <b>Basal</b>  | 0,613 (0,61) | 0,174 (0,11) | 0,273 (0,26) | -0,060 (0,34) | -0,192 (0,28) | 0,112 (0,24) |
| <b>0-5'</b>   | 0,777 (0,36) | 0,051 (0,12) | 0,072 (0,26) | 0,037 (0,44)  | -0,368 (0,12) | 0,044 (0,12) |
| <b>15-20'</b> | 0,482 (0,80) | 0,015 (0,14) | 0,101 (0,20) | -0,048 (0,43) | -0,105 (0,31) | 0,079 (0,25) |
| <b>25-30'</b> | 0,482 (0,45) | 0,036 (0,07) | 0,101 (0,14) | -0,099 (0,20) | -0,148 (0,30) | 0,058 (0,20) |

*Nota. Els valors s'expressen com a mitjana (desviació estàndard).*

La variància de les sis variables cardiovasculars seleccionades durant els diferents salts temporals varen ser recopilades en tres PC. En la formació del PC1, en estat basal, estan implicades dos variables principals: PAS i dP/dt, mentre que al llarg del temps de recuperació augmenta la coordinació entre PAS i PAD i disminueix progressivament la presència de la variable dP/dt, per la qual cosa disminueix la seva coordinació (Taula 3). El PC2 està format per: PAS, VS (que incrementa amb el pas del temps de recuperació i en proporció a l'estat basal) i RVP (que apareix com a tercera variable, però de forma lleugera) (Taula 4). Mentre que el PC3 està compost per una sola variable: FC, la qual augmenta en la primera fase de la recuperació (minut 0 - 5) (Taula 5).

## DISCUSIÓ

---

En el present treball s'ha observat com les variables i la coordinació cardiovascular fluctuen en les diferents fases de la recuperació després de la realització del HIIT.

### **1. Valoració de les hipòtesis**

Com a principals troballes, destaca un endarreriment evident de la FC durant el període de recuperació, així com un patró d'evolució molt semblant pels paràmetres: PAS, PAD i fracció dP/dt. A més, trobem un VS que no varia amb l'entrenament d'alta intensitat, i una RVP que disminueix radicalment en els primers 5 minuts de recuperació. En l'àmbit de la coordinació cardiovascular, destacar una disminució dràstica dels PC en el primer salt temporal de la recuperació, així com un augment d'aquests després dels 30 minuts respecte a l'estat basal.

Alguns dels resultats observats han estat els esperats a les hipòtesis, mentre d'altres no. A nivell cardiovascular es pensava que el VS tindria una variació més semblant a la FC a causa de la seva condició de paràmetres cardíacs, amb un endarreriment d'ambdues variables, per la qual cosa amb els resultats obtinguts es rebutja la part de la hipòtesi relativa a aquesta; així com la RVP on s'esperava un augment significatiu després dels 30 minuts. Per altra banda, s'accepta la hipòtesi del endarreriment de la FC durant la recuperació.

Respecte a la coordinació cardiovascular s'esperava que el major nombre de components principals es trobés en l'estat basal dels individus per l'absència de fatiga, però, per contra, després dels 30 minuts de recuperació es veu un augment del PC3 en un 56,25% dels individus, o mínim s'observa un manteniment del nombre de components principals; i tan sols en 2 casos, veiem una disminució de la coordinació passats els 30 minuts. Malgrat aquesta condició, no podem rebutjar la hipòtesi, ja que sí que esperàvem una disminució de la coordinació cardiovascular després de la realització del HIIT (minut 0 - 5), a causa de l'aparició de la fatiga i una recuperació lenta i progressiva.



## **2. Adaptacions dels paràmetres cardiovasculars**

Els paràmetres cardiovasculars varien amb l'exposició a l'entrenament d'alta intensitat, donant lloc a adaptacions, principalment en el període de recuperació. És important tenir en compte que, a l'hora d'observar com evolucionen els paràmetres CV, existeix una disparitat significativa entre la demanda potencial de flux sanguini a l'exercitar els músculs i la capacitat del cor que, afegida als elements circulatoris, eviten que la conductància vascular del múscul arribi a nivells tan elevats (González-Alonso et al., 2008).

Tal com s'esperava a l'estudi, s'ha vist un augment de la FC a l'inici del període de recuperació, produït per l'activació del sistema nerviós simpàtic (SNS) i les demandes del metabolisme, és a dir, a causa de la necessitat d'incrementar el volum de sang a l'aparell locomotor i d'induir la producció d'adrenalina i noradrenalina, augmentant la resposta del sistema d'alerta (Torres Ortiz, 2021). Com ja esmenta Seiler et al. (2005), malgrat el més esperat és trobar els valors màxims de FC durant l'exercici, no sempre és així, i especialment quan parlem d'interval de curta duració, on l'endarreriment de la FC es veu enfortit per una disminució progressiva i un reequilibrament entre el SNS i sistema nerviós parasimpàtic (Meade et al., 2018).

Pel que fa al VS, s'esperava veure un patró semblant al de la FC, però, per contra, la variable es mantenia estable, amb un lleuger augment en els primers 5 minuts després de la realització del HIIT. El comportament del VS podria veure's afectat per diversos factors, que podrien influir en el nostre estudi com la posició del cos (decúbit supí, dret, assegut) o el nivell d'hidratació (González, 2008; Mortensen et al., 2008). Però, així i tot, la naturalesa i intensitat òptimes per produir adaptacions en el VS no s'han definit amb precisió encara. Per una banda, Cumming (1972) va reportar que el VS màxim s'aconseguia en el període de recuperació; i d'altres com Meade et al. (2018), suggereixen que després d'un breu temps d'haver finalitzat l'exercici el VS ja es troba en valors similars a l'estat basal. Una de les teories més àmpliament difoses és la teoria central integradora, que explica la disminució del VS per l'existència d'un límit regulador del cor. Són diverses observacions (Keul et al., 1981; Flamm et al., 1990; González-Alonso et al., 2003) les que proporcionen evidència de què el VS disminueix durant

l'exercici màxim i sustenten la caiguda de la despesa cardíaca (DC). Per tant, si mantenir un correcte VS semblés ser un factor transcendental per la millora de la DC, l'entrenament a una intensitat associada al VS podria ser de gran rellevància (Lepetre, 2004).

Respecte a la pressió arterial, durant la pràctica d'exercici físic s'ha observat que es produeix un augment durant l'esforç (Daida H. et al., 1996), però després de pocs minuts d'haver realitzat l'exercici es produeix un efecte hipotensiu per sota dels valors basals, persistent al cap de 30 o 60 minuts (Romero et al., 2017). Cal tenir en compte que a l'hora de dur a terme les mesures dels diferents paràmetres CV es va fer passats 5 minuts després de la realització del HIIT, de manera que ja s'havia produït l'efecte hipotensiu (Figura 1). En el present estudi, veiem com la PAS està per sota de l'estat basal en els primers 5 minuts, i al llarg del període de recuperació aquesta persisteix en uns valors baixos, a diferència de la PAD, la qual té una seqüència semblant, però es manté més estable. Tot i així, és important conèixer que són diversos factors els que poden provocar canvis en la pressió arterial i podrien afectar a les diferències observades entre la PAS i la PAD, com la massa muscular, l'edat o la posició en què es fa la presa de dades, i alterar la dinàmica de fluids (Álvarez et al., 2013).

Per finalitzar cal parlar dels paràmetres circulatoris, on la RVP disminueix dràsticament, en els primers 5 minuts de recuperació (Figura 1) i es manté al llarg d'aquest període, a causa de la vasodilatació, que es produeix en les zones de teixit muscular prèviament actiu i per l'acció del sistema nerviós (Romero et al., 2017). A més, el manteniment de la RVP durant el procés de recuperació per sota del basal podria estar influenciat per l'acció de la bomba muscular arterio-venosa, ja que l'entrenament intermitent amb períodes curts de treball s'ha vist que podria alterar-la (Hoff et al., 2002).

En el cas del  $dp/dt$ , que es refereix a la força de contractibilitat del cor, s'observa un descens en la primera valoració després de l'exercici, possiblement relacionat amb la disminució en la RVP i la vasodilatació dels vasos (Romero et al., 2017). En aquest sentit, la menor RVP disminuiria la resistència a vèncer per part del ventricle per expulsar la sang (Klabunde, 2012).

### **3. Coordinació cardiovascular**

En els darrers anys, en l'àmbit de la fisiologia de l'esport, s'ha donat una major importància a la fisiologia de les xarxes o Network Physiology amb la investigació de la coordinació entre sistemes (Balagué et al., 2017). Al mateix temps, s'ha vist que el rendiment esportiu no es pot reduir a la visió clàssica amb l'estudi de l'activitat enzimàtica i mitocondrial, a les proteïnes musculars o als gens de l'esportista (Hristovski et al., 2017).

Durant dècades no s'ha trobat una resposta clara quant a l'aparició de la fatiga, pel que podria ser que no es doni per l'acumulació o falta de certs metabòlits, sinó que per inestabilitat de les xarxes integrals de l'organisme. Així doncs, quan ens troben davant d'un procés d'elevada fatiga, s'han de donar una sèrie d'adaptacions per poder continuar amb l'acció desitjada i la xarxa ha de fer ajustos a diferents nivells per poder continuar amb l'activitat (Hristovski & Balagué, 2010; Pol et al., 2019). Aquest procés explicaria per què els PC del nostre estudi varien al llarg de la recuperació, que com veurem a continuació, depenen en part de la diferència entre individus, però alhora hi ha diversos factors que podrien explicar les variacions que ocorren.

Com podem observar a la Taula 2 (Resultats), el valor del PC1 varia al llarg dels salts temporals, igualment com passa amb els altres components principals. Sabem que el PC1 és el que presenta una major variància de dades i, per tant, podem dir que un gran percentatge dels resultats obtinguts es pot explicar a través d'aquest, però agafa un major o menor pes depenent de la secció temporal en què es trobi. Per exemple, en els primers minuts de la recuperació el valor de PC1 és de 3'09, sent així el valor més elevat, en canvi, pels darrers minuts de la recuperació (25 – 30'), el valor del PC1 disminueix fins a un valor de 2'83 i augmenta la presència dels altres PC. Per tant, com ja comenten Novikov et al. (2021), l'aparició de la fatiga s'observa en el fet que es perd coordinació i es redueixen el nombre de components principals, però amb el pas del temps, segons sembla, es van recuperant fins a arribar a l'estat basal, i inclús superar la coordinació d'aquest estat.

Una de les troballes més destacades de l'estudi és precisament el fet que després de la recuperació el nombre d'individus amb 3 PC va augmentar considerablement. Cal tenir en compte que la mostra de l'estudi és petita ( $n=16$ ), pel que aquest resultat podria no ser extrapolable a la població esportista, però així i tot, sembla que hi ha aquesta tendència a augmentar la coordinació després de l'exercici. Com ja esmenten Balagué et al. (2015), en un programa de 6 setmanes d'entrenament no varen observar millores significatives en les variables clàssiques, però la coordinació cardiorespiratòria sí que va millorar; en canvi, després de 3 setmanes sense realitzar aquest tipus d'entrenament la coordinació empitjorava de nou. Es podria deduir, per tant, que l'organisme, després de 30 minuts de recuperació postexercici adquireix un estat de major coordinació cardiovascular que en condicions de repòs. En definitiva, podríem atribuir la falta de coordinació CV en l'estat basal a la falta de pràctica d'exercici d'alta intensitat en els dies previs, però per contra, García et al. (2017) observen com, durant dues proves d'esforç màximes separades tan sols per 10 minuts de descans, els marcadors aeròbics no empitjoren significativament, però sí que es veien diferències coordinatives.

A l'hora de quantificar la càrrega d'entrenament és possible que al centrar-nos en quantitats macroscòpiques (com són els PC que conformen la coordinació cardiovascular) trobem una major informació i més predictiva quant a l'aparició de la fatiga (Novikov et al., 2021), ja que sembla que els canvis en les variables coordinatives podrien aparèixer abans que en les variables clàssiques. Això ens porta a pensar que en els primers 5 minuts de recuperació, on hi ha una disminució dràstica de la coordinació, l'esgotament total dels paràmetres cardiovasculars podria no haver-se donat, però a causa d'aquesta disminució, el rendiment es veu afectat.

El monitoratge i control de càrregues té l'objectiu de predir lesions i optimitzar el rendiment dels esportistes. En la fisiologia clàssica, aquest monitoratge està dominat per la presència d'algoritmes matemàtics que cerquen com integrar múltiples dispositius que ens donen informació de què ocorre a diversos nivells, però que en qualsevol cas no són capaços de capturar el comportament dinàmic, autoorganitzat i no lineal dels sistemes complexos (Montllull et al., 2022). Llavors, si es monitoritzen les variables coordinatives i es veuen disminuïdes, podria estar indicant que aquella

dinàmica està suposant un excés de càrrega d'entrenament per l'esportista. Segons el mètode d'integració de les xarxes, el monitoratge dels esportistes hauria d'estar centrat en la seva percepció a l'hora de regular la càrrega d'entrenament segons la fatiga, ja que és una eina individualitzada, i que pot variar segons el grau de connectivitat de les xarxes fisiològiques (Hristovski, 2017). Així, aquest mètode explicaria perquè cada individu presenta diferent nombre de components principals en l'estat basal (dels 16 participants, 9 presenten 2 PC abans de la realització del HIIT).

Com hem esmentat anteriorment, per tal de recuperar la connectivitat de les xarxes després de la realització del HIIT s'han de donar una sèrie d'ajustos, els quals es reflecteixen en els canvis que sofreixen els components principals i les variables que els conformen.

El PC1 que té el major grau de variància de la coordinació cardiovascular de tots els individus, està format per la pressió arterial sistòlica i la fracció  $dP/dt$  en una primera instància, però resulta curiós observar com aquest grau de coordinació entre variables va disminuint i augmenta la coordinació entre la pressió arterial sistòlica i diastòlica.

Respecte al PC2, aquest està format per les següents variables: PAS, VS i RVP. Malgrat que el VS es manté molt estable quant a l'evolució del paràmetre, la magnitud que representa dins el PC2 augmenta de forma exponencial a mesura que passen els 30 minuts. Per tant, com hem dit anteriorment hi ha variables que amb el temps no es recuperen o es mantenen, però en l'àmbit de la coordinació cardiovascular si varien i es produeixen canvis que ens poden ajudar a quantificar la càrrega.

Pel que fa al PC3 està format únicament per la FC. En aquest cas, en els primers minuts de la recuperació aquest component té una certa rellevància en el còmput total de variància, mentre que al llarg dels 30 minuts de recuperació aquest va perdent força. Aquest fet podria tenir certa relació amb l'endarreriment de la FC, suposant que es dona per causes centrals.

Per concloure, remarcar la importància de conèixer les variables coordinatives, per tal d'establir uns criteris més fiables pel que fa a la monitorització de càrregues, sense deixar de banda les variables clàssiques. És a dir, és important tenir en compte ambdues

branques de la fisiologia de l'esport per tal d'obtenir el màxim d'informació, però cal més coneixement sobre la connectivitat de les xarxes per a conèixer l'organisme com a sistema complex.

#### **4. Limitacions i línies d'investigació futures**

L'estudi en què es basa el present treball presenta certes limitacions. En primer lloc, la mostra analitzada en l'estudi és petita ( $n=16$ ), per la qual cosa l'anàlisi d'aquesta podria no ser representatiu. A més, no es va realitzar un registre ni control sobre la ingesta nutricional els dies previs i el mateix dia de la prova, així com de l'estat d'hidratació, tot i que es va demanar als subjectes mantenir una norma hidratació. En el cas del grup poblacional estudiat, és necessari esmentar que es tracta de persones físicament actives i habituades a l'entrenament HIIT, però en cap cas població general o esportistes d'elit, pel que també seria interessant comparar els resultats amb aquests grups poblacionals.

Per l'anàlisi de variables, es varen seleccionar les esmentades en l'apartat 3.2. *Variables escollides*, donat que són els paràmetres més significatius segons criteris de lògica i no són el resultat d'operacions matemàtiques d'altres, però així i tot, existeixen un gran nombre de paràmetres a estudiar, pel que es podrien canviar o afegir-ne i observar com fluctuen i es relacionen. Així com, també es podrien afegir conceptes estadístics a analitzar com correlacions i covariàncies.

La continuïtat futura d'aquesta línia d'investigació es basa en diverses accions. Una possible línia d'investigació futura seria dur a terme l'estudi de nou amb diferents consideracions metodològiques, ja sigui amb una mostra de participants major, o una mostra més homogènia quant a edat, sexe, nivell d'entrenament, etc. També es podria fer servir un entrenament intervàl·lic d'alta intensitat de tipus diferent, monitorar també el temps d'entrenament (per observar l'evolució de les variables durant l'exercici) o tenir en compte altres paràmetres cardiovasculars.

Malgrat que es reconeixen les diverses limitacions que presenta aquest treball, i mentre són necessaris més estudis en aquest àmbit de la fisiologia de l'esport, s'espera en un futur poder conèixer amb exactitud la resposta integral de l'organisme quant a la càrrega d'entrenament i la seva recuperació.

## CONCLUSIÓ

---

El present treball ha recollit l'evolució de paràmetres cardiovasculars i la seva coordinació immediatament després d'un exercici intervàl·lic d'alta intensitat durant els posteriors 30 minuts.

A través d'aquest s'ha pogut observar un endarreriment evident de la FC, així com un patró d'evolució molt semblant pels paràmetres: PAS, PAD i dp/dT, un manteniment en el temps de recuperació del VS, com a possible regulador del cor i una RVP amb un descens dràstic en els primers minuts de la recuperació.

Pel que fa a la coordinació cardiovascular s'ha vist una disminució d'aquesta en els primers minuts de la recuperació, tal i com s'esperava en la hipòtesi. A més, cal destacar l'augment de la coordinació passats els 30 minuts respecte a l'estat basal i la tendència a presentar canvis en les variables coordinatives abans que en les variables clàssiques, com a predictor de fatiga.

S'ha vist que el HIIT és clarament un estímul potent per a la remodelació fisiològica, però la resposta integradora a aquest tipus d'exercici mereix més atenció en la investigació, ja que hem pogut conèixer que amb les variables coordinatives obtenim una informació diferent i representativa, que complementa les variables clàssiques. Per tant, la fisiologia clàssica és útil, però hi ha una sèrie de preguntes que es queden sense resposta, pel fet que manté una visió reduccionista, i per aquest motiu, és important complementar-la amb la fisiologia de xarxes, donant llavors una resposta més completa. Tot i així, és un àmbit nou que està creixent de forma exponencial i necessita un gran nombre d'estudis que donin suport a la connectivitat de les xarxes.

## AGRAÏMENTS

---

En primer lloc, al professor Iker García Alday per haver-me recolzat i ajudat durant tot el procés d'elaboració del TFG.

Als meus pares, el meu germà i els meus padrins per tot el suport i afecte rebut durant els 5 anys de titulació universitària.

A la ciutat de Girona i a totes les persones i amics que he conegut durant aquesta etapa, per ser testimonis del meu procés evolutiu.

I en últim lloc i no menys important, al Dr. Sergi Garcia Retortillo per haver-me descobert una nova branca de les Ciències de l'Activitat Física i l'Esport: Network Pysiology of Exercise, i ensenyar-me la seva inquietud per la investigació i la professió.



## BIBLIOGRAFIA

---

1. Álvarez, C., Olivo, J., Robinson, O., Quintero, J., Carrasco, V., Ramírez-Campillo, R., Andrade, D. C., & Martínez, C. (2013). Efectos de una sesión de ejercicio aeróbico en la presión arterial de niños, adolescentes y adultos sanos [Effects of a single bout of aerobic exercise on body weight and blood pressure among healthy participants]. *Revista medica de Chile*, *141*(11), 1363–1370. <https://doi.org/10.4067/S0034-98872013001100001>
2. Alvarez López, M., Alcalá López, J. E., Baún Mellado, O., Tercedor Sánchez, L., Ramírez Hernández, J. A., Rodríguez Padial, L., & Azpitarte Almagro, J. (1997). Utilidad del índice Doppler delta P/delta t en la evaluación de la disfunción sistólica ventricular izquierda [Usefulness of the Doppler index delta P/delta t in the evaluation of left ventricular systolic dysfunction]. *Revista española de cardiología*, *50*(2), 105–110. [https://doi.org/10.1016/s0300-8932\(97\)73187-7](https://doi.org/10.1016/s0300-8932(97)73187-7)
3. Argus, C. K., Driller, M. W., Ebert, T. R., Martin, D. T., & Halson, S. L. (2013). The effects of 4 different recovery strategies on repeat sprint-cycling performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *8*(5), 542-548. <https://doi.org/10.1123/ijsp.8.5.542>
4. Balagué, N., Hristovski, R., Almarcha, 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>
5. Balagué, N., Hristovski, R., García, S., Aguirre, C., Vázquez, P., Razon, S., & Tenenbaum, G. (2015). Dynamics of Perceived Exertion in Constant-Power Cycling: Time- and Workload-Dependent Thresholds. *Research quarterly for exercise and sport*, *86*(4), 371–378. <https://doi.org/10.1080/02701367.2015.1078870>
6. Balagué, N., Torrents, C., Hristovski, R., & Kelso, J. A. (2017). Sport science integration: An evolutionary synthesis. *European journal of sport science*, *17*(1), 51–62. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1198422>
7. Batacan, R. B., Jr, Duncan, M. J., Dalbo, V. J., Tucker, P. S., & Fenning, A. S. (2017). Effects of high-intensity interval training on cardiometabolic health: a systematic

- review and meta-analysis of intervention studies. *British journal of sports medicine*, 51(6), 494–503. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095841>
8. Buchheit, M., & Laursen, P. B. (2013). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle: Part I: cardiopulmonary emphasis. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 43(5), 313–338. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0029-x>
  9. Burgomaster, K. A., Howarth, K. R., Phillips, S. M., Rakobowchuk, M., Macdonald, M. J., McGee, S. L., & Gibala, M. J. (2008). Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. *The Journal of physiology*, 586(1), 151–160. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.142109>
  10. Chicharro, J. L., & Mojares, L. M. L. (2008). *Fisiología clínica del ejercicio*. Ed. Médica Panamericana.
  11. Cumming G. R. (1972). Stroke volume during recovery from supine bicycle exercise. *Journal of applied physiology*, 32(5), 575–578. <https://doi.org/10.1152/jappl.1972.32.5.575>
  12. Daida, H., Allison, T. G., Squires, R. W., Miller, T. D., & Gau, G. T. (1996). Peak exercise blood pressure stratified by age and gender in apparently healthy subjects. *Mayo Clinic proceedings*, 71(5), 445–452. <https://doi.org/10.4065/71.5.445>
  13. Di Prampero, P. E., Cortili, G., Celentano, F., & Cerretelli, P. (1971). Physiological aspects of rowing. *Journal of applied physiology*, 31(6), 853–857. <https://doi.org/10.1152/jappl.1971.31.6.853>
  14. Farto, E. R. La fatiga y la recuperación de los nadadores: Un factor relevante en el rendimiento deportivo.
  15. Flamm, S. D., Taki, J., Moore, R., Lewis, S. F., Keech, F., Maltais, F., Ahmad, M., Callahan, R., Dragotakes, S., & Alpert, N. (1990). Redistribution of regional and organ blood volume and effect on cardiac function in relation to upright exercise intensity in healthy human subjects. *Circulation*, 81(5), 1550–1559. <https://doi.org/10.1161/01.cir.81.5.1550>
  16. Gandevia S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiological reviews*, 81(4), 1725–1789. <https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.4.1725>

17. 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>
18. Gibala, M. J., & Jones, A. M. (2013). Physiological and performance adaptations to high-intensity interval training. *Nestle Nutrition Institute workshop series*, *76*, 51–60. <https://doi.org/10.1159/000350256>
19. González-Alonso J. (2008). Point: Stroke volume does/does not decline during exercise at maximal effort in healthy individuals. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, *104*(1), 275–280. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00595.2007>
20. González-Alonso, J., Crandall, C. G., & Johnson, J. M. (2008). The cardiovascular challenge of exercising in the heat. *The Journal of physiology*, *586*(1), 45–53. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.142158>
21. González-Alonso, J., & Calbet, J. A. (2003). Reductions in systemic and skeletal muscle blood flow and oxygen delivery limit maximal aerobic capacity in humans. *Circulation*, *107*(6), 824–830. <https://doi.org/10.1161/01.cir.0000049746.29175.3f>
22. Hellsten, Y., & Nyberg, M. (2015). Cardiovascular Adaptations to Exercise Training. *Comprehensive Physiology*, *6*(1), 1–32. <https://doi.org/10.1002/cphy.c140080>
23. Herbert, P., Hayes, L. D., Sculthorpe, N. F., & Grace, F. M. (2017). HIIT produces increases in muscle power and free testosterone in male masters athletes. *Endocrine connections*, *6*(7), 430–436. <https://doi.org/10.1530/EC-17-0159>
24. Hristovski, R., Aceski, A., Balague, N., Seifert, L., Tufekcievski, A., & Cecilia, A. (2017). Structure and dynamics of European sports science textual contents: Analysis of ECSS abstracts (1996-2014). *European journal of sport science*, *17*(1), 19–29. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1207709>
25. Hristovski, R., & Balagué, N. (2010). Fatigue-induced spontaneous termination point--nonequilibrium phase transitions and critical behavior in quasi-isometric

- exertion. *Human movement science*, 29(4), 483–493.  
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2010.05.004>
26. Hoff, J., Wisløff, U., Engen, L. C., Kemi, O. J., & Helgerud, J. (2002). Soccer specific aerobic endurance training. *British journal of sports medicine*, 36(3), 218–221.  
<https://doi.org/10.1136/bjism.36.3.218>
  27. Inglés, D., Valenzuela, A. V., & Martínez, B. J. S. A. (2016). Efecto del Entrenamiento Interválico de Alta Intensidad en Corredores. Revisión Sistemática. *Journal Revista de Entrenamiento Deportivo*, XXX, 3(1).
  28. Jolicoeur, P., Gluck, M. A., & Kosslyn, S. M. (1984). Pictures and names: Making the connection. *Cognitive psychology*, 16(2), 243-275
  29. Jolliffe, I. T. (2002). Principal component analysis for special types of data (pp. 338-372). Springer New York.
  30. Klabunde, R. E. (2012). *Cardiovascular physiology concepts* (2nd ed). Lippincott Williams & Wilkins/Wolters Kluwer.
  31. Kellmann, M., Bertollo, M., Bosquet, L., Brink, M., Coutts, A. J., Duffield, R., Erlacher, D., Halson, S. L., Hecksteden, A., Heidari, J., Kallus, K. W., Meeusen, R., Mujika, I., Robazza, C., Skorski, S., Venter, R., & Beckmann, J. (2018). Recovery and Performance in Sport: Consensus Statement. *International journal of sports physiology and performance*, 13(2), 240–245.  
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0759>
  32. Keul, J., Dickhuth, H. H., Simon, G., & Lehmann, M. (1981). Effect of static and dynamic exercise on heart volume, contractility, and left ventricular dimensions. *Circulation research*, 48(6 Pt 2), 1162–1170.
  33. LaForgia, J., Withers, R. T., & Gore, C. J. (2006). Effects of exercise intensity and duration on the excess post-exercise oxygen consumption. *Journal of sports sciences*, 24(12), 1247–1264. <https://doi.org/10.1080/02640410600552064>
  34. Lepretre, P. M., Koralsztejn, J. P., & Billat, V. L. (2004). Effect of exercise intensity on relationship between VO<sub>2</sub>max and cardiac output. *Medicine and science in sports and exercise*, 36(8), 1357–1363.  
<https://doi.org/10.1249/01.mss.0000135977.12456.8f>

35. MacInnis, M. J., & Gibala, M. J. (2017). Physiological adaptations to interval training and the role of exercise intensity. *The Journal of physiology*, 595(9), 2915–2930. <https://doi.org/10.1113/JP273196>.
36. Martínez, P., Hristovski, R., Vázquez, P., & Balagué, N (2017). Chasing in Biological Systems. A Pedagogical Example for Learning General Dynamical Systems Concepts. In *Complex Systems in Sport, International Congress Linking Theory and Practice* (p. 130).
37. McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2006). *Essentials of exercise physiology*. Lippincott Williams & Wilkins.
38. Meade, R. D., Crandall, C. G., Gagnon, D., & Kenny, G. P. (2018). Greater fluid loss does not fully explain the divergent hemodynamic balance mediating postexercise hypotension in endurance-trained men. *Journal of Applied Physiology*, 124(5), 1264-1273. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00988.2017>
39. Migliore, Ricardo A, & Darú, Víctor. (2011). ¿La fracción de eyección sigue teniendo vigencia cuando podemos evaluar la función ventricular con nuevos índices de deformación?. *Revista argentina de cardiología*, 79(5), 429-435. Recuperado en 20 de mayo de 2023, de [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-37482011000500008&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-37482011000500008&lng=es&tlng=es).
40. Montull, L., Slapšinskaitė-Dackevičienė, A., Kiely, J., Hristovski, R., & Balagué, N. (2022). Integrative Proposals of Sports Monitoring: Subjective Outperforms Objective Monitoring. *Sports medicine - open*, 8(1), 41. <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00432-z>
41. Mortensen, S. P., Damsgaard, R., Dawson, E. A., Secher, N. H., & González-Alonso, J. (2008). Restrictions in systemic and locomotor skeletal muscle perfusion, oxygen supply and VO<sub>2</sub> during high-intensity whole-body exercise in humans. *The Journal of physiology*, 586(10), 2621–2635. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.149401>

42. Novikov, N. M., Zolotaryova, S. Y., Gautreau, A. M., & Denisov, E. V. (2021). Mutational drivers of cancer cell migration and invasion. *British journal of cancer*, 124(1), 102–114. <https://doi.org/10.1038/s41416-020-01149-0>
43. Périard, J. D., Travers, G. J. S., Racinais, S., & Sawka, M. N. (2016). Cardiovascular adaptations supporting human exercise-heat acclimation. *Autonomic neuroscience: basic & clinical*, 196, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2016.02.002>
44. Platonov, V. N., & Bulatova, M. (2007). *La preparación física*(Vol. 3). Editorial Paidotribo.
45. Pol, R., Hristovski, R., Medina, D., & Balague, N. (2019). From microscopic to macroscopic sports injuries. Applying the complex dynamic systems approach to sports medicine: a narrative review. *British journal of sports medicine*, 53(19), 1214–1220. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-097395>
46. Ramos, J. S., Dalleck, L. C., Tjonna, A. E., Beetham, K. S., & Coombes, J. S. (2015). The impact of high-intensity interval training versus moderate-intensity continuous training on vascular function: a systematic review and meta-analysis. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 45(5), 679–692. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0321-z>
47. Romero, S. A., Minson, C. T., & Halliwill, J. R. (2017). The cardiovascular system after exercise. *Journal of Applied Physiology*, 122(4), 925–932. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00802.2016>
48. Seiler, S., & Hetlelid, K. J. (2005). The impact of rest duration on work intensity and RPE during interval training. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37(9), 1601–1607
49. Torres Ortiz, J. F. (2021). La variabilidad de la frecuencia cardíaca y su evaluación en deportes de resistencia, una mirada bibliográfica. *Revista Digital: Actividad Física Y deporte*, 7(1). <https://doi.org/10.31910/rdafd.v7.n1.2021.1617>
50. Villalón, J. M., & Farré, A. L. (2016). El corazón del deportista. *Recuperado el*, 26

## ANNEXES

---

### Annex 1:

#### Paràmetres principals cardíacs

- **La freqüència cardíaca (FC)** o quantitat de batecs que realitza el cor per minut és un dels paràmetres més sovint estudiats.

El sistema nerviós autònom (SNA) s'encarrega de mantenir l'homeòstasi corporal durant i després de la pràctica d'exercici, i es produeixen adaptacions fisiològiques amb el temps (Taralov et al., 2015). La freqüència cardíaca és un dels marcadors fisiològics que es poden avaluar per identificar nivells d'estrès o fatiga posterior a l'entrenament i identificar si hi ha una recuperació o adaptació de l'exercici, permetent una correcta quantificació de les càrregues d'entrenament (Olivares-Arancibia et al., 2021), però cal tenir en compte que hi ha una inèrcia a la FC en interrompre l'exercici que podria ser problemàtica, ja que podria generar una sobreestimació de la càrrega fisiològica d'entrenament en els períodes de recuperació.

També és important tenir en compte el concepte d'endarreriment de la FC a l'inici de l'exercici, perquè en intervals curts o de mitja durada els valors màxims no sempre es localitzen en intensitat d'exercici perquè tarda més a respondre en comparació al consum d'oxigen (Cerretelli, 1971).

- **Pressió arterial.** La pressió arterial sistòlica és la pressió causada quan el cor es contrau i empeny la sang per l'artèria i la diastòlica és la pressió que ocorre quan el cor es relaxa i ocorre l'ompliment de sang.

Com esmenta Inglés (2016), s'ha vist que amb l'entrenament i sobretot en persones que no es troben dins l'elit, els paràmetres de pressió arterial disminueixen.

- **Volum sistòlic (VS)** o quantitat de sang que el cor bombeja en cada batec.

El comportament del VS podria veure's afectat per diversos factors entre els quals González (2008) esmenta: el nivell d'entrenament, naturalesa de l'exercici, posició del cos, nivell d'hidratació, etc. En general, en individus joves amb aptitud cardiorespiratòria mitjana, el HIIT provoca augments significatius del  $VO_{2max}$  que van acompanyats

d'augment en el VS. Però, igualment com passa amb la FC, hi ha un endarreriment en el VS màxim, per la qual cosa aquest augment s'aconsegueix durant la recuperació i no durant l'exercici com a tal (Cumming, 1972).

Per tant, mantenir un volum adequat d'ompliment sembla ser un factor transcendental per millorar la funció cardíaca i l'entrenament a una intensitat associada al màxim volum sistòlic (VS) pot ser molt important (Lepetre, 2004).

### **Paràmetres principals vasculars**

En general, els paràmetres vasculars han estat menys estudiats que els cardíacs, i sobretot, si parlem d'esportistes de rendiment. Però és important també veure com aspectes més centrals influeixen en la perifèria de l'organisme i a la inversa, ja que sabem que les sessions HIIT podrien desencadenar adaptacions cardiocirculatòries mitjançant ajustaments cardiovasculars que ocorren específicament durant els períodes de recuperació.

- **Resistència vascular perifèrica (RVP).** És causada per la fricció entre la sang i les parets dels vasos, en la mesura de la resistència al flux, o sigui de l'oposició trobada per la sang en fluir pels vasos sanguinis.

Pel que fa a les adaptacions fisiològiques que propicia l'entrenament intervàl·lic d'alta intensitat, el dèficit transitori d'oxigen a nivell perifèric genera una quantitat d'adaptacions cel·lulars que desencadenen en una major producció d'eritropoïa i glòbuls vermells i finalment millora la captació i el transport d'oxigen. Tot i això, alguns estudis mostren no va haver-hi diferències significatives quant a la RVP.

- **Fracció  $dp/dt$ .** És un nou mètode, sorgit recentment, per calcular la funció sistòlica a través de Doppler. Serveix per calcular la velocitat d'ascens de la pressió de la sang del ventricle esquerre cap a les artèries.

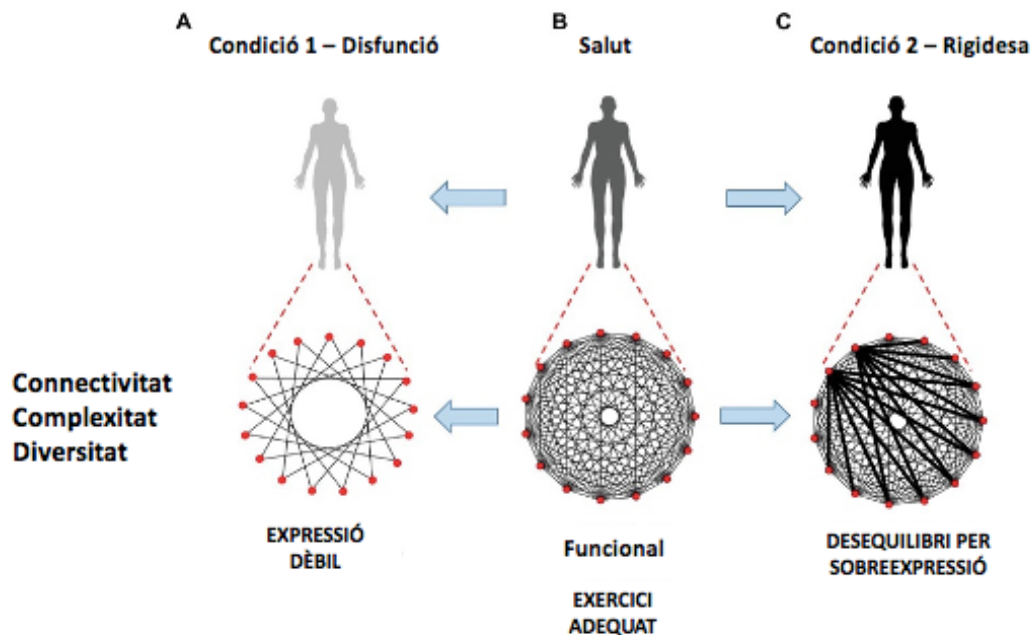
Aquest paràmetre sovint s'ha emprat per trobar l'estat de contractibilitat del miocardi en persones amb afeccions cardíques, però s'ha vist ens pot oferir dades interessants quant a performance, ja que aquest paràmetre es veu afectat per les precàrregues i postcàrregues cardíques, és a dir, influenciat pels paràmetres cardíacs esmentats anteriorment.



## Bibliografia:

- Di Prampero, P. E., Cortili, G., Celentano, F., & Cerretelli, P. (1971). Physiological aspects of rowing. *Journal of applied physiology*, 31(6), 853–857. <https://doi.org/10.1152/jappl.1971.31.6.853>
- Espinoza-Salinas, A., Zafra-Santos, E., Sabattini-Herrera, C., Sanchez-Molina, J., Bobadilla-Olivares, M., & Arenas-Sánchez, G. (2020). CINÉTICA DE RECUPERACIÓN DEL CONSUMO DE OXÍGENO EN DEPORTISTAS FEDERADOS. *Revista Internacional De Medicina Y Ciencias De La Actividad Física Y Del Deporte*, 20(80), 513–527. <https://doi.org/10.15366/rimcafd2020.80.003>
- Inglés, D., Valenzuela, A. V., & Martínez, B. J. S. A. (2016). Efecto del Entrenamiento Interválico de Alta Intensidad en Corredores. Revisión Sistemática. *Journal Revista de Entrenamiento Deportivo*, XXX, 3(1).
- Miglioremsac, R. A. (2010). Is It Still Valid to Measure Ejection Fraction When There Are New Deformation Indexes to Evaluate Ventricular Function?. *Echocardiography*, 27, 407-14.
- Sañudo, B., César-Castillo, M., Tejero, S., Nunes, N., de Hoyo, M., & Figueroa, A. (2013). Cardiac autonomic response during recovery from a maximal exercise using whole body vibration. *Complementary therapies in medicine*, 21(4), 294–299. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2013.05.004>
- Taralov, Z. Z., Terziyski, K. V., & Kostianev, S. S. (2015). Heart Rate Variability as a Method for Assessment of the Autonomic Nervous System and the Adaptations to Different Physiological and Pathological Conditions. *Folia medica*, 57(3-4), 173–180. <https://doi.org/10.1515/foimed-2015-0036>

## Annex 2: Influència de la fatiga en la creació de xarxes coordinatives



**Figura 1.** Aquesta figura mostra la complexitat del sistema, i com un excés o manca en la connectivitat pot afectar la coordinació de l'individu. Adaptat de Balagué, N., Hristovski, R., Almarcha, 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>

## Annex 3: Network Physiology of Exercise

La Network Physiology of Exercise (NPE) pretén iniciar una nova àrea en Ciències de l'Exercici i l'Esport, amb un enfocament en les lleis bàsiques de les interaccions i els principis de la coordinació i integració entre diversos sistemes fisiològics a través d'escales espaciotemporals. També es pretén comprendre com sorgeixen els estats fisiològics i millorar l'eficàcia de l'exercici en la salut i el rendiment esportiu.

La NPE en centrar-se en la millora del coneixement sobre la dinàmica de les interaccions de xarxes verticals i en la integració horitzontal dels sistemes i òrgans claus de l'exercici, pot enriquir la fisiologia bàsica i els camps que l'envolten per

millorar la comprensió de diversos fenòmens relacionats amb l'exercici, com el rendiment esportiu, la fatiga, el sobreentrenament o les lesions esportives.

#### Bibliografia:

- Balagué, N., Hristovski, R., Almarcha, 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>
- Hristovski, R., Aceski, A., Balague, N., Seifert, L., Tufekcievski, A., & Cecilia, A. (2017). Structure and dynamics of European sports science textual contents: Analysis of ECSS abstracts (1996-2014). *European journal of sport science, 17*(1), 19–29. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1207709>