



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Psicologia dello Sviluppo e della Socializzazione

**Corso di Laurea Magistrale in Psicologia di comunità,
della promozione del benessere e del cambiamento sociale**

Tesi di Laurea Magistrale

**L'autoregolazione psicofisiologica negli atleti:
applicazioni del biofeedback e del neurofeedback
nell'ottimizzazione della performance e nel recupero da infortunio**

**Psychophysiological self-regulation in athletes:
biofeedback and neurofeedback applications
in performance optimization and injury recovery**

Relatrice

Prof.ssa Caserotti Marta

Laureanda: Ferrari Alice

Matricola: 2156357

Anno Accademico 2025/2026

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1 - LE EMOZIONI NELLO SPORT.....	3
1.1 Definizione di emozione.....	3
1.2 Approcci teorici allo studio delle emozioni.....	5
1.3 Componenti delle emozioni.....	6
1.4 Il ruolo delle emozioni nel contesto sportivo.....	10
1.5 Funzioni delle emozioni nello sport.....	11
CAPITOLO 2 - ASPETTI PSICOFISIOLOGICI E REGOLAZIONE EMOTIVA.....	15
2.1 Il Sistema Nervoso Autonomo e l'attivazione psicofisiologica: modelli teorici	15
2.1.1 Sistema simpatico e parasimpatico.....	16
2.1.2 La teoria dell'attivazione ottimale.....	19
2.1.3 Il modello delle zone di funzionamento ottimale.....	20
2.1.4 Approccio multidimensionale in relazione all'ansia.....	21
2.1.5 La teoria delle catastrofi.....	23
2.2 Variabilità interindividuale nella risposta emotiva.....	23
2.2.1 Determinanti psicologici della variabilità.....	24
2.2.2 Determinanti fisiologici della variabilità.....	28
2.3 Strategie di regolazione emotiva negli atleti.....	31
2.3.1 Tecniche cognitive.....	32
2.3.2 Tecniche comportamentali.....	35
2.3.3 Tecniche sociali.....	36
2.3.4 Autoregolazione guidata tramite feedback fisiologico e cerebrale.....	37
CAPITOLO 3 - IL BIOFEEDBACK NELLO SPORT.....	39
3.1 Principi generali del biofeedback.....	39
3.1.1 Basi teoriche e meccanismi di funzionamento.....	41
3.1.2 Parametri rilevati e tipi di biofeedback.....	45
3.1.3 Strumenti utilizzati.....	49

3.2 Applicazioni del biofeedback per la performance sportiva.....	51
3.2.1 Regolazione dell'arousal prima e durante la competizione.....	52
3.2.2 Controllo della tensione muscolare nel gesto tecnico.....	53
3.2.3 Riduzione della fatica negli sport di resistenza.....	55
3.2.4 Facilitazione del recupero fisico post-competizione.....	57
3.3 Biofeedback nel recupero da infortunio.....	58
3.3.1 Gestione del tono muscolare nell'area lesionata.....	59
3.3.2 Controllo della percezione del dolore durante la riabilitazione.....	60
3.3.3 Supporto al recupero psicologico.....	61
CAPITOLO 4 - IL NEUROFEEDBACK NELLO SPORT.....	65
4.1 Fondamenti neuroscientifici del neurofeedback.....	65
4.1.1 Plasticità cerebrale e meccanismi di funzionamento.....	67
4.1.3 Tipi di neurofeedback e strumenti utilizzati.....	69
4.1.1 Tipologie di onde cerebrali e relativi protocolli.....	72
4.2 Applicazioni del neurofeedback per la performance sportiva.....	79
4.2.1 Ottimizzazione dell'efficienza cognitiva e della reattività motoria.....	80
4.2.2 Precisione del gesto tecnico e abilità percettivo-motorie.....	81
4.2.3 Autoregolazione emotiva e gestione dell'ansia.....	83
4.3 Neurofeedback nel recupero da infortunio.....	84
4.3.1 Riabilitazione post-concussione cerebrale.....	85
4.3.2 Regolazione di stress e motivazione durante la riabilitazione.....	87
4.3.3 Trattamento della kinesiofobia.....	89
CAPITOLO 5 - IMPLICAZIONI PRATICHE E PROSPETTIVE	
FUTURE.....	91
5.1 Criticità attuali.....	91
5.2 Prospettive future.....	98
CONCLUSIONI.....	103
Bibliografia.....	107

INTRODUZIONE

Nel panorama sportivo contemporaneo l'eccellenza non è più un traguardo raggiungibile solo attraverso il potenziamento delle abilità atletiche, ma richiede anche una padronanza dei processi psicofisiologici. La vera discriminante del successo si può identificare nella capacità dell'atleta di governare lo stress e l'attivazione emotiva derivante dalla competizione. Come evidenziato da Gong e collaboratori (2021), infatti, gli individui che hanno acquisito la capacità di regolare il proprio stato mentale hanno maggiori probabilità di raggiungere prestazioni sportive eccellenti rispetto a coloro che non ci riescono. L'emozione non è più vista quindi come un'interferenza da eliminare ma come un segnale fisiologico che può essere decodificato, interpretato e modulato.

Alla luce di tali premesse, la presente tesi intende indagare se e in quale misura gli strumenti di monitoraggio dei parametri psicofisiologici e di restituzione di feedback in tempo reale, come il biofeedback e il neurofeedback, possano favorire nell'atleta la transizione da una condizione di passività rispetto ai processi autonomici a una condizione di consapevolezza dei propri stati psicofisiologici e di capacità di modularli. La capacità di modulazione dei propri stati psicofisiologici verrà indagata non solo come fattore facilitante per l'efficienza prestativa, ma anche come presupposto fondamentale per un completo recupero da infortunio.

La presente tesi si articola in cinque capitoli: partendo dall'analisi del fenomeno emotivo, si esamineranno successivamente le applicazioni del biofeedback e del neurofeedback in ambito sportivo. Nello specifico, nel primo capitolo si analizzano gli approcci teorici allo studio delle emozioni e le loro componenti, descrivendo poi il ruolo e le funzioni nel contesto sportivo. Il secondo capitolo approfondisce la dimensione psicofisiologica degli stati emotivi, analizzando il ruolo del Sistema Nervoso Autonomo e specificando i determinanti psicologici e fisiologici della variabilità interindividuale nella risposta emotiva. Vengono successivamente descritte le strategie di regolazione emotiva negli atleti, con l'obiettivo di fornire un quadro teorico delle metodologie d'intervento cognitive, comportamentali e sociali che possono essere impiegate anche in combinazione con il biofeedback e il neurofeedback. Nel terzo capitolo viene analizzato il biofeedback, esaminando in particolare i meccanismi di funzionamento e i parametri fisiologici monitorati. La trattazione si focalizza successivamente sulle applicazioni di

tale strumento per l'ottimizzazione della prestazione sportiva e per il recupero da infortunio. Il quarto capitolo è dedicato all'analisi del neurofeedback, esplorando i fondamenti neuroscientifici e i protocolli basati sulle diverse onde cerebrali. Analogamente al capitolo precedente, l'analisi si concentra in seguito sulle applicazioni in ambito sportivo nel potenziamento della performance e nelle fasi riabilitative post-infortunio. Infine, il quinto capitolo esamina i limiti attuali del biofeedback e del neurofeedback, delineando successivamente le prospettive future affinché tali strumenti possano consolidarsi nelle routine di allenamento e nei protocolli riabilitativi.

La presente tesi intende quindi evidenziare come l'uso del biofeedback e del neurofeedback possa favorire nell'atleta l'internalizzazione delle strategie di autoregolazione e affinare la consapevolezza interocettiva. Il fine ultimo è riflettere su una visione dello sport che ponga al centro l'essere umano nella sua totalità e che tenga conto della natura multidimensionale dell'eccellenza sportiva e del recupero da infortunio.

CAPITOLO 1

LE EMOZIONI NELLO SPORT

1.1 Definizione di emozione

Un'emozione è una reazione breve e multicomponentiale ai cambiamenti nell'interpretazione o valutazione delle circostanze in cui si trova l'individuo (Atkinson et al., 2017). Si definisce quindi come uno stato affettivo di breve durata poiché tende ad avere una durata limitata nel tempo, generalmente pari a qualche secondo o pochi minuti (Scherer, 2005), distinguendosi così dagli umori, i quali sono invece degli stati affettivi che perdurano per maggior tempo. La dinamica temporale delle emozioni e la relativa capacità di modularne l'inizio e la fine dipendono da fattori personali, contestuali e culturali, come le esperienze passate dell'individuo, il livello di consapevolezza emotiva, le strategie di regolazione apprese, le norme sociali e le aspettative culturali riferite a quella specifica situazione. Questi elementi influenzano quindi la modalità, la velocità e l'intensità con cui le emozioni vengono espresse (Gross, 2014).

Dal punto di vista funzionale le emozioni hanno una valenza adattiva fondamentale: esse permettono di riconoscere rapidamente la rilevanza di un evento e di prepararsi a rispondere in maniera funzionale. Secondo Frijda (1986) le emozioni agiscono come segnali che orientano l'attenzione e la motivazione, fornendo quindi all'individuo informazioni sul significato degli eventi e facilitando la presa di decisioni in contesti complessi. Lazarus (1991) sottolinea che le emozioni derivano dalla valutazione cognitiva delle circostanze, indicando quando uno stimolo presente nell'ambiente rappresenti un'opportunità o una minaccia e guidando quindi degli agiti comportamentali coerenti con la situazione. Le emozioni non sono essenziali solo per l'adattamento individuale, ma lo sono anche per il funzionamento e la coesione dei gruppi sociali: pur essendo esperienze interne, vengono espresse attraverso segnali corporei e influenzano comportamenti osservabili, permettendo agli altri membri del gruppo di comprendere lo stato interno dell'individuo e facilitando la cooperazione, l'empatia e la regolazione delle interazioni interpersonali (Keltner & Kring, 1998).

La funzione comunicativa delle emozioni è stata ampiamente studiata da Ekman (1971, 1992, 1993), anche in collaborazione con Friesen (1971, 1974), ed è stato evidenziato come alcune emozioni sono considerabili universali, quindi riconoscibili indipendentemente dalla cultura di appartenenza. Gli autori suggeriscono che le emozioni di base, ossia rabbia, paura, tristezza, felicità, sorpresa e disgusto, hanno radici biologiche profonde e non sono quindi apprese. Attraverso lo sviluppo del *Facial Action Coding System* (FACS), Ekman e Friesen (1978) hanno codificato in modo sistematico i movimenti dei muscoli facciali associati a ciascuna emozione, permettendo di analizzare con precisione come il volto possa trasmettere informazioni sullo stato interno di un individuo. Studi successivi hanno evidenziato che la capacità di riconoscere dall'espressione del volto e interpretare in modo corretto le emozioni altrui è cruciale nei rapporti interpersonali e quindi fondamentale per una navigazione efficace in contesti sociali complessi (Elfenbein & Ambady, 2002). Negli ultimi decenni sono emerse diverse critiche che hanno messo in discussione l'evidenza riportata negli studi di Ekman sull'universalità delle emozioni: Russell (1994) ha evidenziato l'influenza del contesto culturale e sociale sul riconoscimento e sulle interpretazioni anche delle emozioni di base individuate da Ekman. Ciò che è importante sottolineare è che sebbene siano emerse evidenze contrarie alle conclusioni tratte da Ekman, egli ha comunque aperto la strada allo studio sistematico delle emozioni. Gli approcci contemporanei sull'ambito di studio, come ad esempio la teoria costruttivista delle emozioni proposta da Barrett (2017), sostengono che le emozioni non sono entità biologicamente fisse, ma sono delle costruzioni cognitive e dinamiche basate sulle esperienze passate dell'individuo e sul contesto culturale.

Le emozioni sono quindi considerate processi dinamici e complessi, influenzati dall'interazione tra fattori biologici, cognitivi e socio-culturali, e la loro comprensione richiede un approccio multidisciplinare che integri prospettive psicofisiologiche, cognitive e sociali, al fine di coglierne appieno sia la funzione adattiva e motivazionale a livello individuale sia la funzione sociale nei rapporti con gli altri individui. La visione integrata è necessaria non solo per approfondire le conoscenze teoriche sulle emozioni, ma anche per avere un risvolto applicativo e per sviluppare strategie efficaci di regolazione emotiva, capaci di promuovere il benessere dell'individuo in tutti gli ambiti della vita (Gross, 2014).

1.2 Approcci teorici allo studio delle emozioni

Nel tempo i filosofi hanno spesso affermato che le emozioni sono pericolose e dannose per l'armonia sociale: per gli antichi Greci il *pathos* era la parte irrazionale dell'anima, contrapposta al *logos*, e comprendeva tutti gli istinti irrazionali che legano l'uomo alla sua natura animale e che dunque gli impedivano di innalzarsi al livello divino (Nussbaum, 2001). Più avanti, l'approccio evoluzionistico rappresentato da Darwin (1872) ipotizzò che le emozioni derivino da caratteristiche che, nel corso della storia evolutiva, si sono rivelate utili alla sopravvivenza dell'individuo: le espressioni facciali associate alle emozioni sarebbero meccanismi automatici simili a riflessi e possono perciò essere innescate in modo involontario.

Qualche anno dopo, lo psicologo James (1884) ipotizzò che le emozioni abbiano origine dalla risposta fisiologica che si verifica in risposta ad uno stimolo ambientale. Secondo l'autore, sarebbe la successiva percezione di tali cambiamenti corporei, mediata dal sistema nervoso, a generare nell'individuo il sentimento soggettivo cosciente, per cui "ci sentiamo tristi perché piangiamo, proviamo rabbia perché colpiamo, abbiamo paura perché tremiamo" (James, 1884, p. 190, tda). Parallelamente a James, anche il medico danese Lange (1885) sostenne che l'esperienza emotiva fosse la conseguenza dei cambiamenti fisiologici che si verificano in risposta ad uno stimolo ambientale. La teoria, proposta separatamente dai due autori senza una collaborazione diretta, prese il nome di "teoria periferica", evidenziando quindi l'attribuzione dell'origine dell'esperienza emotiva alle reazioni corporee periferiche dell'organismo (Lange & James, 1922). L'ipotesi proposta da James e Lange ebbe una notevole influenza sulla ricerca psicologica dei decenni successivi: essa favorì infatti l'interesse per lo studio dei correlati fisiologici delle emozioni, ponendo le basi per l'approccio psicofisiologico allo studio dell'esperienza emotiva. Nonostante questo, la teoria periferica fu oggetto di critiche per il suo riduzionismo fisiologico: Cannon (1927) osservò che l'attivazione periferica che si genera in uno stato emotivo sembra essere indifferenziata e non emozione-specifica, le modificazioni viscerali sono troppo lente rispetto alla rapidità con cui emergono le emozioni e la nostra consapevolezza delle attivazioni corporee periferiche è talvolta limitata. L'autore, con il contributo di Bard, formulò una teoria alternativa a quella proposta da James: secondo il modello Cannon-Bard (1927) lo

stimolo ambientale attiva il talamo e l'ipotalamo, generando contemporaneamente la percezione soggettiva dell'emozione e le risposte fisiologiche periferiche.

Negli anni Sessanta, Schachter e Singer (1962) proposero la “teoria bifattoriale”, secondo cui l'emozione scaturirebbe da un'attivazione fisiologica indifferenziata, seguita da una valutazione cognitiva che determina l'emozione percepita in base alle conoscenze e alle esperienze dell'individuo. Successivamente Lazarus (1991) perfezionò l'approccio teorico di tipo cognitivo, sostenendo che ciò che determina l'emozione esperita è la valutazione cognitiva (*appraisal*). Quest'ultima si configura come l'esito della valutazione dello stimolo ambientale, il quale può essere interpretato dall'individuo come un beneficio o una minaccia, e a cui fa seguito l'attivazione fisiologica.

Dai diversi approcci presi in considerazione emerge come le emozioni derivino dall'interazione tra attivazione fisiologica e valutazione cognitiva dello stimolo ambientale, evidenziando quindi la complessità dei processi che le generano. Al fine di regolare il vissuto emotivo di un individuo si può quindi intervenire sia sul piano cognitivo sia sul piano fisiologico. Sul piano cognitivo, infatti, modificando la valutazione degli stimoli ambientali si può modulare la risposta emotiva: tecniche di ristrutturazione cognitiva permettono di reinterpretare la situazione in modo più adattivo, riducendo le emozioni disfunzionali (Gross, 1998). Sul piano fisiologico si può invece intervenire su parametri quali la variabilità della frequenza cardiaca, la frequenza respiratoria, la tensione muscolare e l'attivazione neurale per influenzare direttamente l'esperienza emotiva dell'individuo. L'accesso consapevole a tali parametri può essere facilitato da strumenti come il biofeedback e il neurofeedback, i quali forniscono in tempo reale informazioni sul proprio stato di attivazione fisiologica e neurale e permettono quindi di apprendere strategie di autoregolazione e di migliorare la capacità adattiva di risposta agli stimoli ambientali (Khazan, 2013; Jung, et al., 2025; Lorenzetti, et al., 2018).

1.3 Componenti delle emozioni

L'emozione è definita come “multicomponentiale” poiché coinvolge un insieme di diversi componenti fisiologiche, cognitive e comportamentali, le quali permettono

quindi all'individuo un efficace adattamento all'ambiente circostante (Izard, 2010). In ambito sportivo, la rapidità con cui si attivano e si modificano le emozioni costituisce un elemento cruciale nei processi di adattamento: la capacità dell'atleta di riconoscerle e regolarle efficacemente può incidere in modo significativo sulla prestazione e sui processi decisionali (Gross, 1998; Hanin, 2000).

Lazarus (1991) propone una visione multidimensionale dell'emozione, individuando sei componenti distinte: cognitiva, fisiologica, comportamentale, espressiva, soggettiva e regolativa.

La componente cognitiva riguarda i processi di valutazione cognitiva, ossia l'attribuzione del significato personale da parte dell'individuo delle circostanze in cui si trova: non è quindi l'evento in sé a generare l'emozione, ma il modo in cui viene interpretato (Lazarus, 1991). Nel contesto sportivo, la valutazione cognitiva gioca un ruolo fondamentale: l'interpretazione della competizione in corso da parte dell'atleta può infatti incidere sulla prestazione. Ad esempio, un atleta che interpreta la gara a cui sta partecipando come una sfida stimolante può sperimentare un'attivazione emozionale funzionale, mentre un atleta che la percepisce come una minaccia può manifestare un vissuto emozionale che porta all'inibizione e al conseguente calo della performance (Jones, 1995).

La componente fisiologica comprende le modificazioni corporee interne, in particolare quelle che coinvolgono il sistema nervoso autonomo, come ad esempio le variazioni nella frequenza cardiaca, nella conduttanza cutanea o nella respirazione, e che preparano l'individuo all'azione adattiva (Cacioppo et al., 2012). Soprattutto in ambito sportivo, la componente fisiologica non si limita alla preparazione all'azione ma svolge anche una funzione comunicativa e autoregolativa: le sensazioni corporee autopercepite, come il battito accelerato, fungono da indicatori che permettono all'atleta di riconoscere il proprio stato emotivo e di regolarlo in tempo reale (Kreibig, 2010).

La componente comportamentale è invece relativa alle tendenze al pensiero e all'azione. Ogni emozione comporta infatti una predisposizione ad agire in un certo modo: ad esempio, la rabbia orienta all'attacco, la paura alla fuga, il disgusto all'espulsione, la gioia all'apertura e alla cooperazione (Frijda, 1986). Naturalmente, le persone non agiscono invariabilmente in base alle urgenze che accompagnano le loro emozioni: si tratta infatti di tendenze al pensiero o all'azione e non pensieri e azioni di per sé. Tali

tendenze si trasformano in azioni a seconda della complessa interazione tra controllo da parte dell'individuo dei propri impulsi, norme culturali vigenti e altri fattori (Atkinson et al., 2017). Ciò che è fondamentale evidenziare è il fatto che le emozioni portano con sé una tendenza al pensiero e all'azione proprio per la loro funzione adattiva da un punto di vista evolutivo: per le emozioni negative si pensa che le specifiche tendenze siano ciò che ha funzionato meglio in situazioni di vita o di morte (Levenson, 1994) e per le emozioni positive si ipotizza che le relative tendenze siano ciò che ha permesso di costruire risorse personali durature, come l'ottimismo e il sostegno sociale (Fredrickson, 1998). In ambito sportivo queste tendenze guidano le strategie di risposta durante la competizione ma la loro efficacia dipende dalla capacità dell'atleta di regolarle in modo coerente con le esigenze situazionali (Hanin, 2000). Ad esempio, un atleta che sperimenta rabbia dopo un errore commesso può essere spinto, secondo ciò che è stato illustrato in precedenza, verso un comportamento di attacco. È quindi necessario che tale energia emotiva venga canalizzata e adattata per non incorrere in condotte impulsive, come un fallo di reazione, e venga quindi trasformata in un'azione appropriata e funzionale alla competizione: la rabbia può quindi tradursi in maggiore determinazione e aggressività agonistica (Robazza & Bortoli, 2007).

La componente espressiva è riferita ai movimenti muscolari facciali, ma anche al cambiamento della postura o alla modifica vocale, attraverso cui le emozioni diventano osservabili dall'esterno. Secondo Ekman (1992) tali espressioni facciali hanno una doppia funzione: comunicano i propri stati interni agli altri e anche forniscono feedback al soggetto stesso, contribuendo quindi al processo di consapevolezza emotiva. In questa ottica l'autore identifica un insieme di emozioni di base universali, ossia gioia, rabbia, paura, tristezza, sorpresa e disgusto, caratterizzate da pattern espressivi innati e riconoscibili in tutte le culture (Ekman & Friesen, 1971). Tale prospettiva non è stata però esente da critiche: diversi autori hanno messo in discussione l'ipotesi di un legame univoco e universale tra l'emozione esperita e l'espressione facciale, evidenziando quindi come l'espressività collegata alle emozioni non corrisponderebbe a delle categorie determinate biologicamente, ma si manifesterebbe dall'interazione tra processi cognitivi, contesto sociale e significati culturali (Russell, 1994; Barrett, 2017). Nel contesto sportivo tale aspetto risulta particolarmente rilevante, considerando che le espressioni degli atleti possono diventare anche strumenti strategici: un atleta può

consapevolmente regolare la propria espressione facciale per sostenere il clima di squadra, tentando di influenzare lo stato emotivo dei compagni (Tamminen & Crocker, 2013), oppure per influenzare gli avversari all'interno della "battaglia psicologica" tipica delle situazioni competitive (Jekauc et al., 2021).

La componente soggettiva riguarda lo stato affettivo o il tono sentimentale che influenza l'esperienza privata, quindi la percezione consapevole del proprio stato interno: essa integra i segnali di tipo cognitivo e fisiologico al fine di riconoscere se ciò che si prova è rabbia, ansia, paura o entusiasmo (Izard, 2010). Tale consapevolezza può indurre quindi l'individuo a modulare intenzionalmente la propria attivazione emotiva e adottare strategie di coping efficaci, evitando quindi che le emozioni diventino disfunzionali rispetto al contesto (Gross, 1998). In ambito sportivo la consapevolezza soggettiva è una competenza fondamentale: l'atleta che è in grado di riconoscere rapidamente il proprio stato emotivo può adottare strategie di coping adeguate, evitando che le emozioni intense compromettano la prestazione. Questa percezione interna è strettamente legata alla consapevolezza interocettiva, ossia la capacità di rilevare segnali quali la frequenza del battito cardiaco, il ritmo respiratorio o la tensione muscolare, che fornisce all'atleta la possibilità di attivare strategie di regolazione emotiva (Lane et al., 2012).

La componente regolativa, come già specificato precedentemente, riguarda i processi con cui l'individuo può modulare l'intensità, la durata o l'espressione delle proprie emozioni. Gross (1998) distingue tra strategie di regolazione antecedente, quindi che agiscono prima che l'emozione si manifesti (come la selezione o modifica della situazione e la mobilitazione dell'attenzione) e strategie di regolazione mirata alla risposta, che intervengono invece in seguito all'attivazione dell'emozione (come la modulazione della risposta a livello espressivo o fisiologico, ad esempio il controllo della respirazione). La componente regolativa costituisce quindi un vero e proprio meccanismo di controllo adattivo, fondamentale per ottimizzare la performance durante la competizione (Hanin, 2000) e anche per supportare il recupero da infortunio, aiutando l'atleta ad essere resiliente (Rist et al., 2020).

1.4 Il ruolo delle emozioni nel contesto sportivo

Le emozioni rappresentano un elemento centrale nell'esperienza sportiva, influenzando aspetti specifici della performance e il benessere psicologico degli atleti. Per decenni la letteratura in psicologia dello sport si è concentrata soprattutto sullo studio delle emozioni considerate a valenza negativa, come l'ansia o la paura, e ha considerato quindi la loro relazione con il calo della performance e gli infortuni sportivi (Peris Delcampo, 2024). Negli ultimi anni si è però progressivamente riconosciuto che le emozioni non rappresentano unicamente un elemento di disturbo nella prestazione sportiva: numerose evidenze hanno infatti dimostrato come le emozioni piacevoli possano contribuire al miglioramento della performance sportiva (Peris Delcampo et al., 2024). Il vissuto emotivo di un atleta, in relazione ai suoi effetti sulla prestazione sportiva, raramente segue una direzione univoca: generalmente le emozioni, siano esse positive o negative, non agiscono da sole, e gli sportivi possono sperimentare simultaneamente emozioni di valenza opposta (McCarthy, 2011). Questa complessità implica che l'atleta debba sviluppare strategie efficaci di regolazione emotiva per bilanciare il proprio vissuto interno al fine di ottimizzare la performance.

Negli ultimi decenni si è anche progressivamente superata la netta distinzione tra emozioni positive e emozioni negative, le quali non sono più considerate a priori come facilitanti o meno della prestazione sportiva. Esse vengono quindi valutate in base alla modalità in cui influenzano il rendimento di un determinato atleta in una specifica situazione competitiva (Hanin, 2003). Ad esempio, un'emozione classificata tradizionalmente a valenza negativa, come l'ansia, può risultare funzionale nel caso in cui favorisca l'attenzione e di conseguenza la reattività e la tendenza all'azione.

Costa e Ricci Bitti (2002) evidenziano perfettamente in poche frasi la complessità del vissuto emotivo e della sua intensità all'interno del contesto sportivo:

“Ciò che accomuna le attività sportive non è tanto l'attività motoria o l'esercizio fisico, bensì il portare all'eccellenza e ai limiti delle possibilità umane una data abilità. [...] Il portare al limite, l'esagerazione, il superare costituiscono uno dei meccanismi principali di induzione delle emozioni. [...] L'agonismo, l'aspirazione alla vittoria, la caccia al record inducono le massime prestazioni, e

di conseguenza le intensità emozionali risultano risultano massimamente amplificate per emozioni sia positive che negative. (p. 80)”

1.5 Funzioni delle emozioni nello sport

Le emozioni possono guidare l'atleta nell'ottimizzazione di molteplici aspetti della performance, nella gestione delle dinamiche relazionali con compagni di squadra, allenatori e avversari e nella promozione di processi di recupero psicologico in seguito a eventi stressanti o infortuni (Thatcher et al., 2012). La regolazione emotiva influenza quindi diversi aspetti fondamentali per un atleta, come la preparazione motoria, la regolazione dell'attenzione, il supporto alla motivazione, la memoria, l'apprendimento e la comunicazione sociale.

Le emozioni giocano un ruolo fondamentale nella preparazione motoria, influenzando l'attivazione del sistema corticospinale e la sincronizzazione dei circuiti neuromuscolari (Coombes et al., 2009). La preparazione motoria comprende infatti elementi quali l'attivazione muscolare, il mantenimento della postura e dell'equilibrio e la prontezza del sistema neuromotorio data dai riflessi, quindi le rapide risposte automatiche date in funzione degli stimoli esterni (Enoka, 2015; Ivanenko & Gurfinkel, 2018). Uno studio di Coombes e collaboratori (2009) ha evidenziato che la risposta corticospinale risulta più efficiente e i tempi di reazione più brevi in presenza di un'attivazione negativa, dimostrando quindi come le emozioni possano modulare l'efficienza del sistema motorio. In linea con questo, Wagstaff (2014) ha osservato che la soppressione emotiva rallenta i tempi di reazione e aumenta la percezione dello sforzo, peggiorando in questo caso la performance dei ciclisti impegnati su un circuito di 10 km. È importante sottolineare che l'attivazione emotiva da sola non può determinare la performance ottimale, in quanto l'efficacia della preparazione motoria dipende anche dalla capacità dell'atleta di interpretare e regolare il proprio stato emotivo durante la competizione: gli sportivi che imparano a riconoscere e modulare le proprie emozioni possono quindi trasformare stati di tensione in energia funzionale, massimizzando elementi della prestazione quali rapidità, precisione e coordinazione (Robazza, 2018).

Le emozioni svolgono un ruolo cruciale anche nella modulazione del processo attentivo degli atleti, influenzando la selezione, la focalizzazione e il mantenimento

dell'attenzione durante la prestazione (Walker & Galhenage, 2025). In ambito sportivo, infatti, la capacità di dirigere la propria attenzione verso stimoli rilevanti e di inibire invece quelli irrilevanti è un fattore determinante per avere successo nella competizione (Nideffer, 1993). Le emozioni considerate positive da alcuni autori, come ad esempio entusiasmo, fiducia o soddisfazione, tendono a favorire un allargamento del focus attentivo, permettendo quindi una visione più generale della situazione e una maggiore flessibilità cognitiva (Fredrickson, 2001). Al contrario, le emozioni interpretate come negative, quindi ansia, rabbia o paura, possono indurre un restringimento del campo attentivo, portando l'atleta a concentrarsi su stimoli specifici della situazione che appaiono come minacciosi e attivando quindi il sistema *stimulus-driven* a scapito del controllo *goal-directed* (Eysenck et al., 2007). In ambito sportivo, tale dinamica può avere effetti ambivalenti: un'emozione negativa moderata può infatti incrementare la vigilanza e la prontezza di risposta, migliorando la performance in sport che richiedono l'attenzione focalizzata (come ad esempio il tiro con l'arco). Allo stesso tempo, elevati livelli di attivazione emotiva possono compromettere la capacità dell'atleta di elaborare informazioni complesse e di valutare la situazione ambientale nel suo insieme, riducendo quindi l'abilità di adattarsi rapidamente alle variazioni dell'ambiente (Hanin, 2000). La regolazione emotiva si configura quindi come una competenza fondamentale per l'atleta, in quanto consente di mantenere un livello di attivazione ottimale e di modulare in modo più efficiente i processi attentivi in condizioni di pressione competitiva.

Le emozioni svolgono inoltre un ruolo importante nel sostenere e modulare la motivazione dell'atleta, influenzando la disponibilità ad affrontare lo sforzo e la fatica e la capacità di essere perseveranti, mantenendo quindi l'impegno nel perseguire gli obiettivi a lungo termine. Secondo la *Self-Determination Theory* di Deci e Ryan (1985; 2000) la motivazione intrinseca, quindi quella forma di motivazione che spinge l'individuo a impegnarsi nell'attività per il piacere che ne deriva, si sviluppa quando l'attività in questione soddisfa i bisogni psicologici fondamentali di autonomia, competenza e relazione. In tale prospettiva, in ambito sportivo, la soddisfazione e le emozioni collegate derivanti dal raggiungimento di traguardi, come l'entusiasmo generato da un miglioramento della performance, agiscono come rinforzi rispetto alla motivazione intrinseca verso lo sport praticato, purché siano adeguatamente supportati

da un'efficace strategia di regolazione emotiva (Robazza et al., 2023). È importante sottolineare che anche le emozioni considerate tipicamente negative possono avere un impatto favorevole sulla motivazione: stati emotivi come la rabbia o la frustrazione possono trasformarsi in potenti stimoli motivazionali, se interpretati e regolati in modo funzionale alla situazione (Chen et al., 2019). Ad esempio, la rabbia per un errore commesso durante una competizione o la frustrazione derivante da una sconfitta può tradursi nel desiderio di migliorare le proprie prestazioni e quindi in un aumento della motivazione dell'atleta. L'interpretazione degli stati emotivi e la conseguente regolazione hanno quindi un ruolo importante nel mediare l'effetto delle emozioni sulla motivazione dell'atleta: studi empirici dimostrano come negli atleti la capacità di regolare le proprie emozioni sia correlata negativamente all'amotivazione (Sukys et al., 2019).

Le emozioni svolgono un'importante funzione anche a livello cognitivo, agendo su memoria, apprendimento e consolidamento delle esperienze. In ambito sportivo, le emozioni possono quindi influenzare la capacità dell'atleta di memorizzare elementi come gli schemi motori e le strategie tattiche, poiché possono modulare sia la memoria dichiarativa relativa ai ricordi degli schemi di gioco da attuare, sia la memoria procedurale per ciò che concerne le abilità dei gesti tecnici (Robazza, 2018). Diversi studi neuroscientifici hanno evidenziato come l'esperire emozioni intense possa facilitare il consolidamento di schemi motori e strategie nella memoria a lungo termine: autori come Cahill e McGaugh (1995, 1998), Phelps (2004) e Dolcos e collaboratori (2005) hanno confermato l'ipotesi secondo cui le emozioni intense modulano l'attività dell'amigdala e la sua interazione con l'ippocampo, potenziando l'immagazzinamento dei ricordi. Gli studi di Abbas e North (2018), Palidis e Fellows (2024), Lopes Martinez e collaboratori (2024) e la meta-analisi di Han e colleghi (2022) hanno evidenziato come un feedback positivo, che induce quindi una risposta affettiva favorevole nell'individuo, promuova l'apprendimento delle abilità motorie.

Le emozioni svolgono anche un'importante funzione di comunicazione sociale nell'ambito sportivo, poiché le espressioni che ne derivano costituiscono un canale immediato attraverso cui gli atleti trasmettono informazioni rilevanti ai compagni di squadra, agli avversari o allo staff tecnico (Smith et al., 2016). In particolare, i cambiamenti corporei, come la modifica delle espressioni facciali o della postura oppure

la variazione del tono della voce, influenzano il modo in cui i membri di una squadra interpretano la situazione competitiva e coordinano quindi le loro azioni (Tamminen, 2013). L'*emotional contagion*, così definito da Barsade (2002), è infatti il processo automatico e inconsapevole attraverso cui gli individui tendono ad allineare il proprio stato emotivo a quello degli altri, mediante l'imitazione delle espressioni e la sincronizzazione dei cambiamenti corporei, creando quindi un clima affettivo comune all'interno del gruppo. A sostegno di questo fenomeno, Totterdell (2000) ha osservato, analizzando squadre di cricket, che gli atleti tendono a sincronizzare i propri stati d'animo durante la competizione, generando un *mood linkage*, ossia il fenomeno per cui le emozioni di un individuo influenzano quelle degli altri membri del gruppo. Uno stato emotivo condiviso può quindi rafforzare la coesione di squadra, la quale risulta essere correlata positivamente alla performance (Carron et al., 2002).

Moll e collaboratori (2010) hanno inoltre evidenziato come le espressioni emotive degli atleti possano influenzare non solo i compagni di squadra, ma anche gli avversari. Analizzando le espressioni emotive dei calciatori durante gli *shootout* di competizioni internazionali, è emerso che le celebrazioni più espansive e visibili (ad esempio, una postura con braccia alzate ed espansione del torace) aumentavano la probabilità che il successivo tiro di rigore dell'avversario fosse sbagliato. Questo risultato suggerisce come le emozioni e le loro espressioni non solo rafforzino il morale tra i compagni di squadra, ma possano anche avere un effetto intimidatorio o disorientante sugli avversari durante la competizione. È quindi evidente come la comunicazione emotiva non verbale assuma un ruolo strategico durante la competizione, contribuendo non solo a costruire un eventuale clima positivo condiviso tra i compagni di squadra, ma anche ad influenzare gli avversari attraverso segnali potenzialmente minacciosi, fattori che possono incrementare la probabilità di successo della squadra.

In conclusione, le emozioni in ambito sportivo possono essere definite come dei sistemi adattivi in grado di influenzare diversi livelli della risposta dell'atleta. In quest'ottica la regolazione emotiva negli atleti diventa una competenza trasversale necessaria, in quanto capace di ottimizzare sia i processi fisiologici e motori sia le funzioni cognitive e le dinamiche relazionali, ottimizzando di conseguenza la prestazione sportiva e il benessere psicologico dell'individuo.

CAPITOLO 2

ASPETTI PSICOFISIOLOGICI E REGOLAZIONE EMOTIVA

2.1 Il Sistema Nervoso Autonomo e l'attivazione psicofisiologica: modelli teorici

Le emozioni sono processi neurobiologici complessi, caratterizzati da un'integrazione dinamica di circuiti corticali e subcorticali: ogni stato emotivo è associato a risposte somatiche e viscerali, coordinate principalmente dai nuclei limbici in connessione con i nuclei del tronco encefalico responsabili del controllo del sistema nervoso autonomo (LeDoux, 1996). Le risposte somatiche e viscerali, come i cambiamenti della frequenza cardiaca, del ritmo respiratorio, della conduttanza cutanea e del tono muscolare, regolano l'adattamento comportamentale e costituiscono quindi la base psicofisiologica dell'esperienza emotiva, un meccanismo evolutivamente conservato per garantire la sopravvivenza attraverso risposte automatiche (Ekman, 1992).

Le risposte fisiologiche non si limitano a riflettere uno stato emotivo, ma preparano l'organismo a reagire in modo funzionale agli stimoli ambientali. Ad esempio, un aumento della frequenza cardiaca e della pressione arteriosa riflette l'attivazione dei nuclei del tronco encefalico che modulano la stimolazione simpatica cardiaca e vascolare, facilitando quindi l'aumento della perfusione tissutale necessario a risposte motorie rapide (Dun et al., 2004). Le emozioni possono essere quindi considerate dei meccanismi di regolazione omeostatica, finalizzati a garantire efficienza ed efficacia comportamentali in condizioni ambientali dinamiche (Kanbara & Fukunaga, 2016). Nel contesto sportivo tali meccanismi assumono un ruolo particolarmente rilevante poiché non solo comportano una reazione immediata in situazioni di stress o sfida, ma aiutano anche l'atleta a modulare la propria attivazione fisiologica per ottimizzare la propria performance (Hanin, 2000) e facilitare il recupero da infortunio (Wiese-Bjornstal et al., 1998).

Il sistema nervoso autonomo (SNA) è il principale mediatore delle risposte psicofisiologiche associate alle emozioni, fungendo da ponte tra i circuiti corticali e limbici e gli organi effettori, quali cuore, polmoni e ghiandole esocrine (Kandel et al.,

2021). I nuclei del tronco encefalico come il nucleo del tratto solitario, il nucleo ambiguo e i centri bulbari respiratori ricevono input dalle strutture limbiche, tra cui l'amigdala e la corteccia cingolata anteriore, e regolano l'attivazione simpatica e parasimpatica del SNA, trasformando la valutazione emotiva in cambiamenti somatici e viscerali (LeDoux, 1996; Critchley, 2005).

2.1.1 Sistema simpatico e parasimpatico

Il sistema nervoso autonomo è la parte del sistema nervoso che controlla in modo automatico la muscolatura striata cardiaca, la muscolatura viscerale liscia e le ghiandole, regolando quindi il battito cardiaco, la respirazione, la digestione e le secrezioni ghiandolari e fungendo da collegamento tra il Sistema Nervoso Centrale e gli organi effettori (Bear et al., 2021). Infatti, il sistema nervoso centrale, costituito da encefalo e midollo spinale, è responsabile dell'elaborazione e dell'integrazione delle informazioni sensoriali, della pianificazione motoria e della regolazione cognitiva e consapevole delle azioni di un individuo (Kandel et al., 2021).

Il SNA è formato dal sistema nervoso simpatico e dal sistema nervoso parasimpatico: il sistema simpatico si attiva generalmente nelle situazioni di emergenza percepite come un pericolo, mentre il sistema parasimpatico entra in azione nelle situazioni di riposo e recupero, favorendo il risparmio energetico. Il sistema simpatico prepara l'organismo ad una risposta fight-or-flight (attacco o fuga), mentre il sistema parasimpatico ripristina lo stato di calma dell'organismo dopo tale risposta: l'equilibrio tra questi due sistemi è fondamentale per il mantenimento dell'omeostasi dell'individuo (Atkinson et al., 2017). L'attivazione di uno dei due sistemi determina cambiamenti fisiologici specifici nell'organismo: il sistema simpatico provoca la dilatazione pupillare, la dilatazione dei vasi sanguigni del cuore e dei muscoli scheletrici, l'aumento della frequenza respiratoria e cardiaca, la costrizione dei vasi sanguigni della pelle e dell'intestino e la liberazione nel circolo sanguigno di adrenalina e noradrenalina, neurotrasmettitori che regolano lo stato di allerta (Atkinson et al., 2017; Bear et al., 2021). Invece, il sistema parasimpatico determina la riduzione della frequenza respiratoria e cardiaca, la riduzione del diametro pupillare, l'aumento della peristalsi intestinale, la dilatazione dei vasi sanguigni della pelle e dell'intestino, facilitando la digestione e andando a stimolare il rilassamento e l'immagazzinamento di energia (Bear et al., 2021).

Il modello classico che distingue il SNA in due branche, quella simpatica e quella parasimpatica, non riesce a descrivere completamente la complessità della regolazione emotiva tipica degli umani, come evidenziato nella teoria polivagale di Porges (1995, 2011). Secondo l'autore, il ramo dorso-vagale del sistema parasimpatico è il più antico circuito di regolazione autonoma, già presente nei rettili e responsabile delle risposte di immobilizzazione di fronte ad uno stimolo percepito come minaccia grave. Con il passaggio evolutivo dai rettili ai mammiferi si sarebbe poi sviluppata l'altra branca del SNA, quindi il sistema simpatico che è in grado di promuovere reazioni di attacco e fuga di fronte ad un pericolo, ampliando così il repertorio difensivo disponibile nell'individuo. Successivamente nei mammiferi si sarebbe sviluppata una terza branca, ossia il sistema parasimpatico ventro-vagale, in grado di attivare comportamenti di *social engagement*; in tale categoria rientrano tutti quei comportamenti di affiliazione e cooperazione, tipici dell'attaccamento, che possono essere attivati quando l'individuo percepisce di essere in una condizione di sufficiente sicurezza (Porges, 2011). La cornice filogenetica assunta da Porges (1995, 2011) segue il concetto di dissoluzione di Jackson (1958), secondo cui i circuiti più evoluti del sistema nervoso inibiscono quelli più primitivi e solo quando questi circuiti più recenti falliscono intervengono i più antichi.

All'interno della teoria polivagale il sistema parasimpatico opera tramite il nervo vago, ossia il decimo nervo cranico, formato da fibre afferenti ed efferenti che innervano diversi organi. Il sistema parasimpatico si ripartisce quindi in due diversi circuiti del nervo vago, i quali si sono sviluppati in momenti diversi dell'evoluzione umana: il circuito ventro-vagale è più recente e mielinizzato e innerva principalmente gli organi sopra-diaframmatici, controllando dunque la muscolatura del volto, della faringe, dei polmoni e del cuore; tale circuito determina la nostra capacità di esprimere le emozioni e promuove così comportamenti di ingaggio sociale. Il circuito dorso-vagale, invece, è più antico e in situazioni di minaccia intensa attiva una risposta difensiva estrema, come lo *shutdown* (spegnimento, come un collasso con dissociazione) ereditato dai vertebrati più antichi, come i rettili. Questi circuiti interagiscono tra di loro per regolare lo stato emotivo: il ventro-vagale favorisce il coinvolgimento sociale, il simpatico prepara l'organismo all'azione difensiva tramite attacco o fuga e il dorso-vagale induce invece immobilità e dissociazione nelle situazioni percepite come pericolo estremo (Porges,

2011). L'attività funzionale del nervo vago riflette l'efficienza del sistema parasimpatico nel regolare le funzioni fisiologiche, sostenendo i processi di adattamento dell'organismo in risposta a stimoli ambientali e stress. Il tono vagale viene solitamente stimato in modo indiretto attraverso l'analisi di specifici indici della variabilità della frequenza cardiaca, nota come Heart Rate Variability (HRV), quali il Root Mean Square of Successive Differences (RMSSD) e l'High Frequency (HF; Laborde et al., 2017).

Nel contesto sportivo l'equilibrio tra il sistema simpatico e quello parasimpatico è fondamentale: un'attivazione di tipo simpatico migliora la prontezza psicomotoria e la capacità di reazione agli stimoli ambientali, mentre un'attivazione parasimpatica favorisce in generale il recupero in seguito agli sforzi fisici eseguiti e la gestione efficace dello stress pre-competizione, ottimizzando la performance (Hanin, 2000). In particolare, l'attività del nervo vago riveste un ruolo centrale in ambito sportivo, influenzando negli atleti sia la performance sia il recupero. Un tono vagale elevato è associato a maggiore acutezza cognitiva, emozioni più stabili e ottimizzazione dell'arousal, migliorando il processo decisionale sotto pressione, e un recupero più rapido (Lopez Blanco & Tyler, 2025). Uno studio di Ortega e Wang (2018) ha evidenziato che la HRV misurata prima di una competizione era correlata positivamente con l'autoefficacia percepita e con la prestazione, mettendo quindi in evidenza che valori più alti della HRV prevedevano performance migliori. Sempre attenendosi alla teoria polivagale (Porges, 1995, 2011), il circuito ventro-vagale, supportando interazioni sociali e comportamenti di affiliazione con gli altri individui, diventa di fondamentale importanza soprattutto negli sport di squadra (Lopez Blanco & Tyler, 2025). Un'efficiente regolazione vagale è considerata un fattore protettivo rispetto agli effetti negativi dello stress acuto sulla performance sportiva. Un tono vagale elevato sostiene infatti una migliore flessibilità neurofisiologica, facilitando il controllo attentivo e motorio (Lopez Blanco & Tyler, 2025) e riducendo la probabilità del fenomeno del *choking under pressure*, ossia il deterioramento della performance in situazioni di pressione nonostante l'individuo possieda la motivazione e le abilità necessarie ad eseguire la prestazione in modo ottimale (Baumeister, 1984).

La finestra di tolleranza, concetto descritto in ambito clinico da Siegel (1999) e collegato alla teoria polivagale proposta da Porges (1995, 2011), di un individuo è l'intervallo ottimale di attivazione del SNA, con un corretto bilanciamento tra il sistema

simpatico e i due circuiti del sistema parasimpatico, in cui si riesce a percepire, elaborare e rispondere agli stimoli in modo funzionale e adattivo. Fluttuare all'interno della finestra di tolleranza è fisiologico: tuttavia, quando l'arousal supera il limite inferiore o superiore di tale finestra si verifica una condizione di disregolazione emotiva e tale condizione impedisce quindi all'individuo di interagire in modo efficace con l'ambiente.

2.1.2 La teoria dell'attivazione ottimale

La relazione tra l'attivazione psicofisiologica e la performance fu inizialmente descritta da Yerkes e Dodson (1908) attraverso la cosiddetta legge di Yerkes-Dodson, ipotizzata in seguito a studi in laboratorio effettuati su ratti: livelli bassi di attivazione riducevano l'apprendimento, mentre livelli eccessivi interferivano con la performance. Il rendimento aumenta quindi in funzione dell'attivazione psicofisiologica fino ad un punto ottimale oltre al quale vi è un progressivo calo progressivo di performance, delineando una funzione parabolica a U rovesciata; tale curva ha ispirato successive applicazioni in altri contesti, tra cui quello sportivo. Martens e Landers (1970) fra gli altri approfondirono la relazione tra attivazione psicofisiologica e prestazione motoria, evidenziando come livelli moderati di arousal possano favorire la stabilità e il controllo motorio. Nel loro studio osservarono che un basso livello di arousal riduceva la prontezza e la precisione dei movimenti, mentre un arousal eccessivo provocava instabilità motoria e forte tensione muscolare, con conseguenti errori nel gesto tecnico da eseguire (Martens & Landers, 1970).

Oltre ad essere presa come riferimento per successivi studi, la teoria del livello di attivazione ottimale fu anche soggetta a critiche: una serie di pubblicazioni di Kerr (1985a, 1985b, 1987, 1989) evidenziò il fatto che molti atleti tendono a ricercare elevati stati di arousal, percependoli come piacevoli e stimolanti per la performance. In particolare, questi risultati suggeriscono che la relazione tra attivazione psicofisiologica e performance non può essere considerata universale per tutti gli atleti: un livello di attivazione ottimale per un atleta può risultare insufficiente o eccessivo per un altro (Jones & Hardy, 1990). Oltre a non prendere in considerazione la variabilità inter-individuale, la legge di Yerkes-Dodson non tiene conto delle caratteristiche contestuali, come il tipo di competizione sportiva (Martens et al., 1990). Tali riflessioni

hanno spinto alla formulazione di modelli più complessi, come il modello delle Zone di Funzionamento Ottimale proposto da Hanin (2000).

2.1.3 Il modello delle zone di funzionamento ottimale

Il modello delle Zone di Funzionamento Ottimale (*Individual Zones of Optimal Functioning*, noto come IZOF) proposto da Hanin (2000) è un perfezionamento dei concetti introdotti dalla legge di Yerkes-Dodson (1908). L'autore osservò che alcuni atleti necessitano di livelli elevati di attivazione per ottimizzare la performance, altri invece ottengono prestazioni migliori con bassi livelli di attivazione.

Hanin ipotizza dunque che per ogni atleta esista un intervallo di stati emotivi, collegati all'attivazione, relativamente stabile nel tempo entro cui la prestazione tende ad essere ottimale; al di fuori di tale zona ci sarebbe un progressivo deterioramento della performance. Questo approccio consente di spiegare l'ampia variabilità nei livelli di ansia e di performance che si trova negli studi che hanno sollevato critiche all'uso della legge di Yerkes-Dodson in ambito sportivo (Gould & Krane, 1992), superando dunque l'idea di un unico punto ottimale di attivazione. Inoltre, il modello IZOF permette di superare la distinzione dicotomica tra emozioni positive e negative in ambito sportivo: le emozioni vengono considerate funzionali o disfunzionali in base all'impatto che hanno sulla performance per ciascun individuo. Hanin (2000) propone quindi quattro categorie in cui raggruppare tutte le emozioni che l'atleta può provare prima, durante e dopo una competizione, ossia le emozioni positive funzionali (P+), positive disfunzionali (P-), negative funzionali (N+) e negative disfunzionali (N-).

Lo studio di Salminen e collaboratori (1995) ha applicato il modello IZOF ad un campione di 80 atleti con l'obiettivo di verificare le ipotesi derivanti dal modello stesso, sottoponendo gli atleti allo *State Trait-Anxiety Inventory* (Spielberger et al., 1970) due settimane, una settimana e un'ora prima della competizione. I risultati hanno evidenziato che i livelli di ansia misurati nelle settimane precedenti alla competizione erano correlati con l'ansia rilevata un'ora prima della gara, suggerendo quindi che l'ansia anticipatoria è un predittore affidabile dello stato emotivo pre-gara. Il confronto tra gli atleti ha inoltre dimostrato che gli individui che si trovavano all'interno della propria zona ottimale raggiungevano risultati significativamente migliori rispetto a

quelli che si trovavano al di fuori di essa, suggerendo che i principi del modello IZOF possano essere applicati al fine di ottimizzare la prestazione attraverso processi di autoregolazione. Non è quindi sufficiente identificare la propria zona ottimale di funzionamento: per massimizzare i risultati l'atleta deve anche essere in grado di regolare le proprie emozioni e il proprio livello di attivazione, adottando strategie che gli permettano di mantenersi all'interno della propria zona ottimale durante la gara. Su questo principio si sono sviluppati studi successivi, anche in Italia, come quello di Robazza e collaboratori (2004) in cui è stato applicato il modello IZOF a otto atleti italiani di alto livello, al fine di valutare l'efficacia di un programma individualizzato di strategie autoregolazione emotiva. I risultati hanno dimostrato che gli atleti che adeguavano il proprio profilo psicofisiologico facendolo restare all'interno della propria zona ottimale ottenevano risultati migliori nelle competizioni.

Il modello IZOF non offre quindi solo un'interpretazione dei meccanismi emotivi implicati nella performance, ma fornisce anche un quadro operativo per interventi mirati e individualizzati di autoregolazione emotiva destinati a uno specifico atleta.

2.1.4 Approccio multidimensionale in relazione all'ansia

Spielberger e collaboratori (1970) descrivono l'ansia come uno stato emotivo caratterizzato da tensione, preoccupazione e apprensione associati ad un'aumentata attivazione corporea. In particolare, gli autori distinguono tra ansia di stato e ansia di tratto: l'ansia di stato è una condizione transitoria che si manifesta nell'individuo quando percepisce una situazione come minacciosa, l'ansia di tratto è invece una disposizione relativamente stabile della personalità di un individuo ed è infatti la tendenza a percepire diverse circostanze come minacciose e a reagire con una costante ipervigilanza. Questa distinzione assume un ruolo rilevante nel contesto sportivo in quanto un atleta può sperimentare un aumento temporaneo di ansia prima o durante una competizione, trattandosi quindi di ansia di stato, mentre alcuni individui presentano una predisposizione più marcata a gestire ansiosamente la pressione relativa ad una gara, come evidenziato da Martens e collaboratori (1980). Gli autori in questione svilupparono infatti degli strumenti per misurare le due diverse tipologie di ansia nel contesto sportivo, come lo *Sport Competition Anxiety Test* (SCAT; Spielberger et al., 1977) e il *Competitive State Anxiety Inventory* (CSAI; Spielberger et al., 1980), il quale si articola in più sottoscale che considerano le diverse componenti dell'ansia. Martens e collaboratori

(1980) considerano infatti sia la componente cognitiva dell'ansia sia quella somatica, individuando la *self-confidence* come fattore protettivo rispetto all'ansia.

L'ansia può essere definita multidimensionale in quanto è un costrutto psicologico articolato in diverse componenti, le quali influenzano in modo differente il comportamento umano (Spielberger, 1972). L'ansia cognitiva si riferisce ai pensieri, alle preoccupazioni e alle immagini mentali che interferiscono in modo negativo con le capacità attentive e la valutazione del compito da svolgere, collegandosi al timore del fallimento in ambito sportivo (Martens et al., 1990). L'ansia somatica comprende invece tutte le modificazioni corporee che riflettono l'attivazione del SNA e che durante la competizione possono avere effetti concreti sulla performance. Ad esempio, l'aumento della tensione muscolare può compromettere la fluidità e la precisione del gesto tecnico e la sudorazione eccessiva può rendere difficile la presa di attrezzi (Parfitt & Pates, 1999). Altri autori propongono però che la relazione tra ansia somatica e performance sportiva segua un andamento ad U rovesciata (Zhao & Zhang, 2025), in accordo con la legge di Yerkes-Dodson (1908). Alcuni studi in ambito sportivo sottolineano l'importanza della componente di percezione soggettiva dell'ansia, quindi la capacità dell'atleta di interpretare come facilitanti o debilitanti gli stati d'ansia provati. Non basta quindi misurare quanto sia intensa l'ansia ma è necessario anche comprendere come l'atleta ne interpreta la direzione, la quale è percepita come facilitante se viene associata ad un'alta percezione di controllo pre-competizione e bassa *disruption* da concentrazione (Jones & Hanton, 2001; Hanton et al., 2002). Vi è poi anche la componente comportamentale, quindi tutte le manifestazioni osservabili nei comportamenti di un individuo che sta provando ansia: l'atleta può sperimentare dei veri e propri blocchi motori in situazioni di alta pressione (Jones, 1995). Nell'ansia vi è anche un aspetto sociale, che influenza significativamente le interazioni tra individui all'interno di un gruppo. Uno studio recente ha dimostrato come elevati livelli di ansia sociale negli atleti adolescenti siano associati ad una diminuzione delle abilità comunicative e di collaborazione tra i compagni di squadra, compromettendo così la coesione e di conseguenza il focus tattico collettivo (Üstündağ et al., 2025).

La comprensione dell'ansia come costrutto multidimensionale evidenzia come non sia sufficiente la sola misurazione dell'intensità per comprenderne il suo impatto sulla performance ed è necessario prendere in considerazione tutte le diverse dimensioni citate.

È quindi fondamentale attuare delle strategie che comprendano interventi cognitivi, psico-fisiologici e comportamentali, permettendo così all'atleta di interpretare lo stato d'ansia provato come facilitante ai fini della performance (Ong & Chua, 2021).

2.1.5 La teoria delle catastrofi

La teoria delle catastrofi nasce in ambito matematico quando Thom (1975) descrive i cambiamenti improvvisi nei sistemi, evidenziando come piccole variazioni in una variabile possono portare a forti cambiamenti nell'altra. Tale teoria venne poi estesa anche ad altri ambiti, arrivando fino alle scienze sociali e comportamentali.

In ambito sportivo la teoria delle catastrofi assunse valore grazie al contributo di Hardy e Parfitt (1991), i quali proposero un modello che considera le variabili dell'attivazione fisiologica, dell'ansia cognitiva e del rendimento sportivo: se il livello di ansia cognitiva è basso, l'andamento tra attivazione e rendimento presenta il consueto andamento ad U rovesciata; se invece il livello di ansia cognitiva è alto, gli aumenti gradualmente del livello di attivazione fisiologica portano ad un miglioramento nella performance fino ad un punto, oltre il quale il rendimento decade improvvisamente. Diversi studi sperimentali confermano le previsioni del modello delle catastrofi: Hardy e collaboratori (1994) manipolarono i livelli di attivazione e ansia cognitiva in atleti di bowling e osservarono che un incremento dell'arousal portava ad un calo drastico della performance quando l'ansia cognitiva era elevata. Tale risultato venne confermato soprattutto in altri sport di precisione (Woodman & Hardy, 2007), suggerendo che l'effetto catastrofe possa essere particolarmente rilevante quando le abilità richieste dalla competizione sono l'alta concentrazione e il controllo motorio fine (Vickers & Williams, 2007).

Nonostante la popolarità avuta dalla teoria delle catastrofi in diversi ambiti e anche nella psicologia dello sport, Gill (1994) avanzò una critica evidenziando i limiti metodologici e applicativi: la complessità del modello tridimensionale proposto rende piuttosto difficile la sua validazione empirica nelle scienze comportamentali, suggerendo la necessità di approcci multidimensionali per comprendere l'influenza dell'arousal sulla performance.

2.2 Variabilità interindividuale nella risposta emotiva

La risposta emotiva varia notevolmente tra i diversi atleti a causa delle differenze nei fattori psicologici e fisiologici oltre che situazionali, come ad esempio le caratteristiche

della competizione, il livello dell'avversario e la rilevanza dell'evento sportivo, anche a livello mediatico (Jones & Hanton, 2001). Come evidenziato da Cerin (2003) tali variabili situazionali possono aumentare o ridurre l'intensità del vissuto emozionale pre-competizione, influenzando sia la percezione della minaccia sia l'autovalutazione delle proprie capacità e avendo effetti diretti sulla preparazione mentale e sulla successiva prestazione. Le differenze psicologiche e fisiologiche tra gli atleti spiegano perché di fronte alla medesima richiesta di performance alcuni individui reagiscono con un incremento funzionale dell'attivazione e del focus attentivo mentre altri sperimentano elementi disfunzionali quali interferenze cognitive, tensione muscolare e conseguente decremento della performance (Jones, 1995; Ruiz et al., 2017).

Comprendere la variabilità nella risposta emotiva diventa fondamentale per spiegare le divergenze osservate nei modelli teorici descritti precedentemente e costituisce il presupposto per costruire interventi di regolazione emotiva personalizzati per ogni atleta.

2.2.1 Determinanti psicologici della variabilità

Ogni individuo interpreta in modo diverso la situazione competitiva, riflettendo differenze nelle caratteristiche psicologiche che influenzano la percezione, la valutazione e la reazione agli stimoli competitivi (Martens et al., 1990). Comprendere la variabilità psicologica è quindi un elemento fondamentale al fine di progettare interventi mirati per migliorare la performance, prendendo in considerazione le caratteristiche cognitive, motivazionali e comportamentali di ciascun individuo (Jones & Hanton, 2001).

Un determinante psicologico è quello relativo ai tratti di personalità dell'atleta, quindi le caratteristiche relativamente stabili del pensiero di un individuo che determinano le modalità tipiche con cui è solito reagire e interagire con l'ambiente (McCrae & Costa, 1999), e in particolare all'ansia di tratto, quindi la predisposizione a percepire le situazioni come minacciose e a reagire con ipervigilanza e preoccupazione costante (Spielberger et al., 1970). In letteratura è stato dimostrato che gli atleti con alti livelli di ansia di tratto tendono a sperimentare ricorrenti preoccupazione e forti autocritiche, riducendo la concentrazione e interferendo con l'esecuzione di compiti motori complessi (Martens & Landers, 1969; Halvari & Gjesme, 1995; Han et al., 2006).

Un altro fattore determinante è la *directional anxiety*, ossia la percezione soggettiva dell'ansia (Jones & Hanton, 2001): non è tanto l'intensità dell'ansia provata a influenzare la performance, ma la modalità con cui l'atleta interpreta tale attivazione. Gli atleti che sono in grado di percepire l'attivazione fisiologica data dall'ansia come facilitante mostrano performance migliori in quanto l'arousal viene canalizzato in energia funzionale e motivazione. Al contrario, quando l'attivazione è interpretata come debilitante, gli atleti avranno un maggior numero di interferenze cognitive, un aumento della tensione muscolare e un peggioramento del controllo motorio (Mellalieu et al., 2006).

La *self-confidence*, ossia la fiducia in se stessi, è un ulteriore determinante psicologico e viene definito come la convinzione stabile di un atleta di poter eseguire con successo un comportamento desiderato (Vealey, 1986): individui con elevati livelli di fiducia in se stessi sperimentano minori interferenze cognitive e somatiche durante la competizione (Craft et al., 2003; Vealey, 2007). In contesti di alta pressione, quindi durante la competizione in cui l'atleta deve spingere al massimo le proprie potenzialità, la fiducia in se stessi funge da fattore protettivo: contribuisce a stabilizzare lo stato emotivo, mitiga l'impatto dell'ansia pre-gara e promuove una regolazione delle emozioni più efficace (Gonzalez-Hernández et al., 2024). Secondo la meta-analisi di Woodman e Hardy (2003) la relazione positiva tra *self-confidence* e performance è statisticamente più forte della relazione negativa tra ansia e performance, evidenziando quindi come la fiducia in se stessi sia un importante fattore psicologico nel predire il successo agonistico.

Anche la resilienza mentale, quindi la capacità dell'atleta di affrontare, gestire e recuperare da situazioni di stress tipiche dell'ambiente sportivo, è un fattore determinante nell'esperienza emotiva (Sarkar & Fletcher, 2014): anche gli studi più recenti in letteratura evidenziano che gli atleti con elevati livelli di resilienza mentale dimostrano maggiori risorse psicologiche utili per gestire le pressioni competitive, come stabilità emotiva, minore vulnerabilità agli stressor pre-gara e maggiore rapidità di recupero dagli eventi altamente stressanti (Stoyanova et al., 2025; Li et al., 2025). Galli e Vealey (2008) hanno evidenziato che gli atleti più resilienti sono in grado non solo di sopportare le difficoltà incontrate, ma dimostrano una capacità di recupero attivo (denominata dagli autori "*bouncing back*") dopo eventi stressanti come infortuni,

sconfitte o cali di performance; il recupero attivo comprende la capacità di ripristinare rapidamente la stabilità emotiva, mantenendo la concentrazione e il focus sull'obiettivo competitivo. Generalmente gli atleti più esperti tendono a sviluppare una maggiore stabilità emotiva e capacità di recupero, quindi una resilienza mentale più elevata, grazie all'esposizione a contesti di alta pressione e alla possibilità di apprendere strategie efficaci di coping. La relazione tra esperienza e resilienza mentale non è però automatica: essa dipende da alcuni fattori mediatori, come la qualità delle esperienze vissute, le strategie di coping sviluppate, la fiducia in se stessi e il supporto psicologico disponibile (Fletcher & Sarkar, 2014; Sarkar & Fletcher, 2012).

Un altro elemento determinante nella risposta emotiva è la motivazione, la quale può essere distinta in due tipologie: la motivazione intrinseca è la spinta a compiere un'attività per il piacere e la soddisfazione personale che ne derivano, senza ricompense esterne, e la motivazione estrinseca è invece quella che deriva dall'aspettativa di ricevere dall'ambiente un beneficio di qualunque tipo, sia esso un riconoscimento, un premio o uno status sociale (Deci & Ryan, 1985). Nell'ambito dello studio della motivazione umana Ryan e Deci proposero la *Self-Determination Theory* (2000), secondo cui la motivazione intrinseca è favorita quando nell'individuo sono soddisfatti i bisogni psicologici fondamentali di autonomia, competenza e relazione. Nel contesto sportivo, come evidenziato da Mageau e Vallerand (2003) nel loro studio sulla relazione allenatore-atleta, la soddisfazione dei tre bisogni psicologici fondamentali individuati da Ryan e Deci (2000) avviene quando il tecnico adotta uno stile di tipo *autonomy-supportive*. Ad esempio, il bisogno di autonomia viene soddisfatto quando si offre opportunità di scelta negli allenamenti e si incoraggia quindi la partecipazione attiva, il bisogno di competenza viene soddisfatto se viene garantita una struttura chiara in cui vengono stabiliti degli obiettivi realistici con feedback costruttivi e specifici che supportano l'apprendimento e il bisogno di relazione viene soddisfatto se si crea un clima di reciproca fiducia ed empatia bidirezionale. La realizzazione di tali comportamenti favorirebbe la motivazione intrinseca, la quale negli atleti è associata ad un maggiore *well-being*, inteso da Jowett (2017) come *self-realization*, *optimal functioning* e *meaningful engagement*, e ad un minore rischio di burnout (Lonsdale et al., 2009).

La motivazione può essere inoltre collegata all'orientamento dell'individuo verso gli obiettivi: l'orientamento al compito (*task orientation*) implica la focalizzazione sulle proprie abilità e sull'apprendimento per migliorarle, mentre l'orientamento al risultato (*ego orientation*) si riferisce alla valutazione della propria performance attraverso il confronto con gli altri (Nicholls, 1984). Studi in ambito sportivo evidenziano che gli atleti *task-oriented*, in aggiunta ad una percezione di competenza, riferiscono minor ansia cognitiva pre-gara (Ommundsen & Pedersen, 1999). La capacità di regolare le emozioni attraverso strategie di coping efficaci è un ulteriore determinante fondamentale, consentendo infatti di ridurre le interferenze cognitive che potrebbero compromettere la performance. In particolare, riducendo l'impatto negativo dell'*arousal* si favorisce uno stato di *flow*, ossia la condizione in cui l'atleta è totalmente immerso nell'attività e sperimenta coinvolgimento emotivo positivo, massima concentrazione, perdita della cognizione del tempo e assenza di sforzo (Jackson & Csikszentmihalyi, 1999).

Tra i determinanti psicologici della variabilità emotiva assume un ruolo rilevante anche l'intelligenza emotiva. Goleman (1995, 1998) definisce tale costrutto come la capacità di identificare, comprendere e gestire le proprie emozioni, unita alla capacità di riconoscere quelle altrui e riuscendo quindi ad influenzare il processo decisionale e le interazioni sociali. Secondo l'autore l'intelligenza emotiva si articola in cinque abilità: la capacità di riconoscere le proprie emozioni e capirne l'impatto sul processo decisionale (*self-awareness*), di gestire e modulare il proprio vissuto emotivo in modo funzionale al contesto (*self-regulation*), di orientare le emozioni verso il raggiungimento di obiettivi a lungo termine (*motivation*), di assumere la prospettiva del vissuto emotivo altrui (*empathy*) e di gestire positivamente le relazioni interpersonali, grazie ad una comunicazione efficace e alla risoluzione dei conflitti (*social skills*).

In ambito sportivo la letteratura suggerisce che gli individui che ottengono punteggi più alti nei test di intelligenza emotiva hanno più successo (Laborde et al., 2016), evidenziando una correlazione positiva tra i tratti di intelligenza emotiva e la performance oggettiva nel corso della stagione (Crombie et al., 2009; Zizzi et al., 2003, Perlini & Haverson, 2006). Tale relazione positiva sarebbe mediata dalla valutazione dello stress competitivo e dalle strategie di coping adottate, in quanto gli atleti con livelli più elevati di intelligenza emotiva tendono a interpretare le situazioni competitive

come sfide piuttosto che come minacce e mettono quindi in atto strategie di gestione dello stress maggiormente funzionali alla prestazione (Laborde et al., 2014). Infatti, livelli più alti di intelligenza emotiva si associano ad una minore intensità di ansia pre-gara (Lu et al., 2010) e ad un minor numero di emozioni negative sperimentate durante la competizione (Lane & Wilson, 2011).

Infine, considerando in particolare le componenti dell'empatia e delle abilità sociali, è stato evidenziato che punteggi più alti di intelligenza emotiva si associano ad un maggior livello di coesione fra i membri di un team (Naeiji & Mehrizi, 2014), favorendo un ambiente collaborativo negli sport di squadra e non limitandosi quindi a potenziare le prestazioni individuali. Va inoltre sottolineato che l'intelligenza emotiva è una competenza allenabile: l'adozione di programmi mirati a sviluppare tale abilità è uno strumento strategico per ottimizzare la regolazione emotiva e favorire la coesione di squadra, migliorando complessivamente la performance sportiva (Campo et al., 2016).

2.2.2 Determinanti fisiologici della variabilità

La risposta emotiva è determinata, oltre che da elementi psicologici, anche da fattori fisiologici, i quali modulano l'attività del SNA e di conseguenza la reattività dell'organismo in risposta agli stimoli dell'ambiente.

Un elemento fisiologico di fondamentale importanza, già citato in precedenza, è il tono vagale, ovvero la capacità del sistema parasimpatico di modulare rapidamente i parametri fisiologici. In particolare, gli individui con un tono vagale elevato sono maggiormente capaci di passare in modo rapido e reversibile da uno stato di calma, tipico quindi del circuito ventro-vagale, ad uno stato di attivazione (Laborde et al., 2017). Questa capacità in ambito sportivo ha un ruolo centrale, traducendosi nella capacità dell'atleta di attivarsi in tempistiche compatibili con le richieste della situazione competitiva in atto e nella successiva abilità di tornare ad uno stato di calma che possa favorire il recupero. Tale flessibilità facilita infatti il controllo attentivo e motorio durante la competizione e migliora inoltre la stabilizzazione emotiva pre-gara (Lopez Blanco & Tyler, 2025).

Un altro elemento fisiologico è quello relativo all'aspetto ormonale, con particolare riferimento alle dinamiche dell'asse ipotalamo-ipofisi-surrene (HPA), responsabile della risposta dell'organismo allo stress: un aumento moderato del cortisolo, il cosiddetto

“ormone dello stress”, può migliorare la reattività e il focus attentivo (Dunlavey, 2018). Invece, un’eccessiva attivazione continua dell’asse HPA porta nel tempo a soppressione immunitaria, alterazioni metaboliche, riduzione della massa magra e indebolimento del tessuto connettivo osseo (Azuma & Rivest, 2015; Bellavance et al., 2014; Bose et al., 2009), elementi che potrebbero quindi intensificare il rischio di un infortunio nell’atleta. Al di là delle conseguenze negative nel lungo termine di un’eccessiva attivazione dell’asse HPA, gli individui con maggior secrezione acuta di cortisolo in risposta ad uno stressor hanno migliori capacità di regolazione emotiva, con particolare riferimento alla strategia di rivalutazione cognitiva (Langer et al. 2020).

Oltre al cortisolo, un altro ormone che assume un ruolo importante nella regolazione emotiva è l’ossitocina, spesso definito come “ormone della socialità”: ad esempio, Heinrichs e collaboratori (2003) hanno osservato che la somministrazione di ossitocina, in combinazione al supporto sociale, sopprimeva l’attivazione dell’asse HPA riducendo l’ansia e favorendo uno stato emotivo più calmo. Inoltre, i soggetti trattati con ossitocina senza combinazione del supporto sociale mostravano comunque, seppur in misura minore, una riduzione dell’ansia. Tali risultati evidenziano che questo ormone ha un effetto modulatore sull’ansia, potenziando nello stesso tempo gli effetti benefici derivanti dal supporto sociale. Diversi studi hanno poi dimostrato che l’ossitocina migliora il riconoscimento delle emozioni altrui, facilitando comportamenti prosociali, la fiducia e la regolazione emotiva in situazioni di gruppo (Domes et al., 2007; Kosfeld et al., 2005). Pepping & Timmermans (2012) sottolineano l’importanza dell’approfondimento del legame tra ossitocina e contagio emotivo nelle prestazioni sportive, qualificandosi come fondamentale soprattutto negli sport di squadra dove tale ormone ha la capacità di aumentare fiducia, generosità, altruismo, coesione, cooperazione e motivazione sociale.

Altri ormoni rilevanti nella risposta emotiva sono le catecolamine, in particolare l’adrenalina e la noradrenalina che sono responsabili della risposta flight or fight tipica del sistema simpatico: il rilascio di tali ormoni aumenta l’arousal fisiologico, accelerando la frequenza cardiaca, la pressione arteriosa e la respirazione, mentre a livello cerebrale modula l’attività di strutture chiave nella regolazione emotiva, come l’amigdala e la corteccia prefrontale (Goldstein, 2010). Secondo Krahenbuhl (1975) l’adrenalina tende ad essere maggiormente legata a stress di tipo psicologico o emotivo,

mentre la noradrenalina sarebbe collegata di più ad uno stress fisico. Al di là della distinzione fatta, l'autore evidenzia che l'aumento delle catecolamine può facilitare la performance fino ad un certo livello, ma l'eccessivo livello di tali ormoni può essere controproducente soprattutto negli sport che richiedono precisione, coordinazione, elevata concentrazione e controllo motorio fine. Nelle catecolamine rientra anche la dopamina, fondamentale sia per le funzioni motorie sia per quelle motivazionali: tale ormone è fondamentale per lo *stamping-in* delle associazioni stimolo-ricompensa e risposta-ricompensa, ovvero per consolidare la memoria che lega determinati stimoli o comportamenti a ricompense (Wise, 2004). La rassegna di Humińska-Lisowska (2024) evidenzia che le variazioni genetiche ed epigenetiche nei geni correlati alla dopamina influenzano tratti psicologici che potrebbero favorire la performance nello sport in generale, tra cui maggiore controllo cognitivo e resilienza emotiva.

A livello fisiologico anche le endorfine sono determinanti nella risposta emotiva, note principalmente per alleviare il dolore e per generare sensazioni di benessere: durante un'attività fisica intensa, come può essere uno sport di resistenza, si osserva un aumento significativo delle endorfine circolanti, fenomeno noto come *runner's high* e caratterizzato da sensazioni di euforia, ridotta percezione dello sforzo e del dolore e rilassamento generale (Boecker et al., 2008).

Oltre a meccanismi ormonali, la risposta emotiva è determinata anche da specifiche aree cerebrali, in particolare la corteccia prefrontale che ha un ruolo fondamentale nel modulare le risposte emotive generate da strutture sottocorticali come l'amigdala: lo studio di neuroimaging di Zotev e colleghi (2013) ha dimostrato che la corteccia prefrontale, soprattutto l'area della corteccia cingolata anteriore rostrale, può esercitare un controllo di tipo top-down sull'amigdala, permettendo di regolare stati emotivi come paura, stress e ansia.

La risposta emotiva negli atleti è quindi il risultato di una complessa interazione tra determinanti psicologici e fisiologici e tale evidenza suggerisce che è necessario comprendere e lavorare contemporaneamente su entrambi i livelli implicati al fine di ottimizzare la performance e di migliorare il benessere dell'atleta, utile anche nelle situazioni di recupero da infortunio. Proprio per tale motivo la psicologia dello sport propone strategie di regolazione emotiva di tipo integrato (Robazza & Ruiz, 2018), capaci di intervenire su processi cognitivi, fisiologici e comportamentali e sostenendo

l'atleta nell'adattamento alla dinamicità del contesto sportivo.

2.3 Strategie di regolazione emotiva negli atleti

Secondo Gross (2015) la regolazione emotiva è il nostro tentativo di influenzare le emozioni provate nel modo in cui pensiamo che possa aumentare la possibilità che siano utili piuttosto che dannose. Le persone possono quindi modificare l'intensità dell'emozione aumentando o diminuendo l'esperienza emotiva o il comportamento associato, la durata dell'emozione prolungando o riducendo il tempo in cui essa persiste e la qualità della risposta emotiva, ad esempio vedendo il lato divertente in una situazione che ha provocato imbarazzo.

La regolazione emotiva nello sport è di fondamentale importanza in quanto permette all'atleta di modulare l'intensità, la qualità e la durata del proprio vissuto emotivo per adattarsi in maniera funzionale alle richieste dell'ambiente competitivo, considerando che le emozioni sono strettamente collegate all'attivazione fisiologica, ai processi decisionali, alla capacità attentiva e alla coordinazione motoria (Hanin, 2000; Jones, 2003). Wagstaff (2014) ha sottolineato l'importanza dell'adozione di strategie efficaci di regolazione emotiva: la sola soppressione delle emozioni negative peggiora la performance degli atleti, avendo tempi di esecuzione più lenti, minor potenza e maggiore percezione dello sforzo. Inoltre, Crawford e collaboratori (2021) hanno dimostrato che la regolazione emotiva nella fase pre-stagionale è un mediatore significativo nelle relazioni tra la *mental toughness* (ossia la capacità di mantenere alte prestazioni, sia fisiche sia mentali) e le valutazioni post-stagionali della percezione di stress, salute mentale e coesione del gruppo.

La letteratura in psicologia dello sport distingue principalmente quattro categorie di strategie di regolazione emotiva, le quali possono essere cognitive, comportamentali, sociali e di autoregolazione assistita tramite feedback. Le strategie cognitive comprendono tutte quelle tecniche volte a modificare pensieri, interpretazioni o immagini mentali, quelle comportamentali si riferiscono a tutti gli interventi che possono essere fatti tramite azioni e comportamenti dell'atleta, quelle sociali si basano sull'interazione e quindi sul supporto da parte di allenatori, compagni di squadra o altre figure rilevanti per lo sportivo e infine quelle di autoregolazione assistita tramite

feedback si riferiscono agli strumenti del biofeedback e del neurofeedback, i quali sfruttano informazioni fisiologiche e cerebrali (Ruiz & Robazza, 2021; Thatcher et al., 2011; Perry et al., 2011). La combinazione di tali strategie in un programma personalizzato per il singolo atleta permette di lavorare contestualmente sui diversi livelli, in accordo con il modello biopsicosociale di Engel (1977). Infatti, intervenendo contemporaneamente su aspetti biologici tramite il monitoraggio e la modulazione fisiologica, su aspetti psicologici tramite tecniche che modificano le cognizioni e su aspetti sociali, sfruttando quindi il supporto dall'ambiente sportivo circostante, è possibile migliorare la performance e anche favorire il recupero psicofisico in seguito a situazioni di stress o infortunio (Thatcher et al., 2021).

2.3.1 Tecniche cognitive

Le strategie cognitive sono uno dei principali strumenti di regolazione emotiva nello sport, dato che permettono di modificare i pensieri, le interpretazioni degli eventi e le immagini mentali con l'obiettivo di ridurre le emozioni disfunzionali, come ad esempio l'ansia e lo stress pre-gara, e indirettamente di migliorare la performance e facilitare il recupero da infortunio (Weiß et al., 2024). Negli ultimi anni si parla sempre di più di *mental training*, ossia l'applicazione di tecniche psicologiche per migliorare le prestazioni sportive nell'ambito di un programma integrato che comprenda l'allenamento sia del gesto tecnico sia degli aspetti psicologici (Cei, 2011). Anche se al giorno d'oggi si parla sempre di più di allenamento integrato, il primo approccio mentale allo sport fu formalizzato nel 1950 dallo psicologo russo Puni, il quale propose il primo modello di allenamento mentale in cui veniva data maggiore importanza ad aspetti psicologici quali ansia, motivazione e concentrazione rispetto alla semplice e classica esercitazione del gesto atletico (Mandolesi, 2017).

La ristrutturazione cognitiva è la tecnica con cui si sostituiscono pensieri negativi con pensieri più funzionali, capaci quindi di promuovere emozioni e di conseguenza atteggiamenti favorevoli alla performance (Gross, 1998). Il self-talk, ossia il dialogo interno, è uno degli strumenti principali per applicare in modo concreto la ristrutturazione cognitiva e si basa sul principio che ciò che le persone pensano e si dicono su di sé è in grado di condizionare positivamente il benessere psicologico e di conseguenza le prestazioni sportive (Hatzigeorgiadis et al., 2008). La ristrutturazione cognitiva permette infatti agli atleti di affrontare situazioni competitive percepite come

minacciose trasformandole in sfide stimolanti, migliorando quindi la concentrazione, la motivazione e la fiducia in se stessi (Brugnoli, 2005). Didymus e Fletcher (2017) riportano degli esempi di ristrutturazione cognitiva che si sono dimostrati efficaci con giocatrici di hockey di alto livello. In particolare, nella situazione in cui la squadra non stava giocando come si era previsto per vincere, il pensiero “Non vinceremo mai” veniva sostituito con “Non è finita finché l’arbitro non fischia”, riducendo il livello dell’irritazione percepita dal 100% al 30%. Quando gli osservatori della Nazionale assistevano alla partita, il pensiero “Non impressionerò” veniva sostituito con “Posso avere un impatto anche se parto dalla panchina”, riducendo il nervosismo percepito del 40%. Infine, in presenza di una grande folla di pubblico, il pensiero “Scommetto che farò errori” è stato sostituito con “Farò del mio meglio”, riducendo il nervosismo del 20% e aumentando l’entusiasmo fino ad un livello percepito pari al 70%. In un recente studio, Robazza e collaboratori (2023), hanno invece esaminato il ruolo della ristrutturazione cognitiva come mediatore nella relazione tra soddisfazione dei bisogni psicologici di base degli atleti, quindi autonomia, competenza e relazione (Ryan & Deci, 2000), e le loro esperienze emotive e biopsicosociali funzionali alla performance. I risultati evidenziano che il soddisfacimento dei bisogni di autonomia e relazione favorisce l’uso di strategie di ristrutturazione cognitiva, le quali a loro volta sono associate ad emozioni positive e stati biopsicosociali percepiti come funzionali alla performance sportiva. È stato inoltre dimostrato come il self-talk possa influenzare le risposte emotive e comportamentali dell’atleta anche in seguito a infortunio, situazione nella quale le cognizioni e le autopercezioni che seguono la lesione possono portare a prospettive future distorte, con un effetto negativo sull’aderenza alla riabilitazione e sul ritorno allo sport (Wiese-Bjornstal et al., 1998). La modifica delle cognizioni negative in pensieri positivi e il conseguente comportamento di ripetersi tali pensieri favoriscono l’accettazione dell’infortunio e la riduzione della catastrofizzazione, ostacolando il decremento di autoefficacia e fiducia (Podlog et al., 2014) e aumentando il mantenimento della concentrazione durante i momenti della fase riabilitativa (Weinberg & Gould, 2015).

L’*imagery*, ossia la visualizzazione mentale, è una tecnica cognitiva in cui l’individuo crea nella propria mente immagini vivide di situazioni (Paivio, 1995), quindi una percezione senza sensazione (Moran, 2004). Hall e collaboratori (1998) hanno

specificato la possibilità di visualizzare anche stati somatici ed emozioni, utili in ambito sportivo: l'atleta può simulare situazioni di gara, anticipando sensazioni di stress e preparandosi quindi emotivamente agli eventi competitivi, riducendo l'ansia e la tensione e favorendo emozioni positive, unite a fiducia, motivazione e concentrazione (Cumming & Ramsey, 2008). Volgemute e collaboratori (2023) hanno evidenziato che gli atleti che usavano tecniche di *imagery*, in particolare quelle di tipo dinamico, quindi riferite a immagini in movimento e non statiche, riportavano maggior autoefficacia e minor ansia pre-gara, mostrando un quadro emotivo maggiormente funzionale alla situazione competitiva. L'uso della visualizzazione è una strategia efficace anche nell'ambito del recupero da infortunio: facilita infatti nell'atleta la capacità di affrontare la situazione, riducendo lo stress e il dolore fisico e migliorando in generale la gestione delle emozioni connesse (Driediger et al. 2006). Oltre che nella fase riabilitativa, l'*imagery* può essere usato anche per agevolare il rientro allo sport dell'atleta, mantenendo ad un livello adeguato la concentrazione e la motivazione e aumentando la fiducia in sé e le risposte emozionali positive (Weinberg & Gould, 2015).

Il *goal setting*, ossia la definizione di obiettivi da raggiungere, è un'altra strategia cognitiva fondamentale nella regolazione delle emozioni: la specificazione di obiettivi aiuta l'atleta a direzionare i propri comportamenti, riducendo incertezza e ansia (Weinberg & Gould, 2015) e aumentando il senso di controllo, fattore centrale nella regolazione emotiva (Locke & Latham, 2002). Gli obiettivi SMART, nati in ambito manageriale e il cui acronimo corrisponde a *Specific, Measurable, Achievable, Relevant* e *Time-bound* (Doran, 1981), sono stati ampiamente promossi come strumento utile al singolo atleta o ad intere squadre al fine di ottimizzare la performance, basandosi sull'osservazione che obiettivi impossibili generano frustrazione e perdita di autoefficacia e i soli obiettivi funzionali sono quelli "sfidanti ma raggiungibili" (Locke & Latham, 1990). Tuttavia, tale approccio ha ricevuto critiche nell'ambito sportivo: Swann e collaboratori (2022) hanno evidenziato una serie di limiti, tra cui il fatto che un uso acritico di tale modello potrebbe portare ad effetti dannosi come la riduzione della motivazione intrinseca. Gli autori raccomandano quindi un utilizzo del *goal setting* flessibile e adattato alle caratteristiche dell'atleta o della squadra e al contesto specifico, in modo che esso diventi uno strumento di regolazione emotiva in grado di supportare la motivazione, di mantenere la fiducia in se stessi e di essere funzionale alla gestione

dello stress e degli stati emotivi negativi. Il *goal setting* può essere inoltre applicato nell'ambito della gestione dell'infortunio: l'uso efficace di questa strategia in fase riabilitativa migliora l'aderenza al trattamento (Siegert et al., 2006) seguendo con maggiore probabilità le indicazioni di recupero anche in ambito domestico e riducendo il livello di frustrazione, ansia e insicurezza (Carson & Polman, 2012).

2.3.2 Tecniche comportamentali

Le strategie comportamentali sono degli interventi mirati a modulare la componente fisiologica e comportamentale dell'esperienza emotiva dell'atleta. A differenza delle strategie cognitive che agiscono modificando i processi mentali, le tecniche comportamentali si concentrano su azioni volontarie che hanno l'obiettivo generale di rendere l'esperienza emotiva funzionale alla performance (Weinberg & Gould, 2015). Tra le strategie comportamentali più usate in ambito sportivo vi sono le tecniche di rilassamento, come la respirazione guidata e il rilassamento muscolare progressivo, delle quali è stato dimostrato come possano aiutare le persone a ridurre lo stress e a migliorare il benessere in generale (Toussaint et al., 2021). In particolare, lo studio di Liang e collaboratori (2021) ha dimostrato che un training di rilassamento progressivo riduceva significativamente gli stati di ansia pre-gara. Inoltre, lo studio di Hashim e Hanafi Yusof (2011) ha evidenziato che le tecniche di rilassamento, come il rilassamento muscolare e il training autogeno (Schultz & Luthe, 1959), riducono gli stati emotivi negativi come confusione, depressione, fatica e tensione. Il training autogeno proposto da Schultz (1959), così come la tecnica di rilassamento progressivo di Jacobson (1938) e la sofrologia formulata da Caycedo (1964), sono approcci integrati che combinano tecniche comportamentali di rilassamento e tecniche cognitive, come ad esempio la visualizzazione, massimizzando l'intervento sulla componente cognitiva e fisiologica dell'esperienza emotiva. Tali approcci in ambito sportivo consentono di favorire negli atleti una maggiore distensione fisica e psichica, combattendo stress, tensioni muscolari, ansia e le relative ripercussioni, come ad esempio tremore e oppressione toracica (Brugnoli, 2005).

Le routine pre-gara e i rituali comportamentali sono strumenti fondamentali in ambito sportivo: favoriscono l'incremento della concentrazione, della fiducia in se stessi e della motivazione, migliorando quindi la capacità di regolare il proprio stato emotivo in funzione delle richieste derivanti dall'ambiente competitivo (Weinberg & Gould, 2015).

In particolare, Cotterill (2010) sottolinea che le routine pre-gara aiutano a costruire un senso di controllo, elemento cruciale per ridurre l'ansia da prestazione, e Mesagno e collaboratori (2008) evidenziano che i rituali personalizzati possono stabilizzare le prestazioni sotto pressione, riducendo la probabilità del *choking under pressure*.

Nelle tecniche comportamentali rientra anche la gestione del sonno, considerando che la quantità e la qualità del sonno influenzano l'umore e la capacità di regolazione emotiva (Palmer & Alfano, 2017) e di conseguenza la performance atletica: gli atleti con routine di sonno regolari mostrano livelli inferiori di ansia, maggiore stabilità emotiva e migliori capacità di recupero fisico e mentale (Cunha et al., 2023). Diventa quindi di fondamentale importanza che gli atleti adottino degli stili di vita coerenti, integrando il sonno regolare ad altre strategie comportamentali mirate, al fine di ottimizzare la regolazione psicofisiologica delle emozioni e di potenziare quindi la performance sportiva (Weinberg & Gould, 2015).

2.3.3 Tecniche sociali

Le strategie sociali di regolazione emotiva si basano sull'idea che la gestione emotiva dell'individuo non avvenga esclusivamente a livello individuale ma sia mediata anche dalle interazioni con altri significativi, i quali in ambito sportivo possono essere rappresentati da allenatore e compagni di squadra. Il supporto sociale è un determinante fondamentale del benessere psicologico dell'atleta e risulta infatti correlato negativamente ad ansia, depressione e stress (Luo et al., 2025), suggerendo quindi che le relazioni interpersonali funzionali contribuiscono alla regolazione emotiva. In particolare, il supporto dell'allenatore è di fondamentale importanza nella regolazione emotiva: i feedback costruttivi, la capacità di leadership unita ad uno stile autorevole, l'incoraggiamento emotivo e un clima motivazionale orientato al processo piuttosto che al risultato sono associati negli atleti ad una maggiore capacità di regolare le emozioni, ad un aumento delle emozioni piacevoli e ad una diminuzione di quelle spiacevoli (Mandolesi, 2017). Di conseguenza, se l'allenatore crea un'atmosfera in cui gli atleti si sentono apprezzati per i loro sforzi personali, il loro impegno e i loro progressi si può favorire uno stile di regolazione emotiva funzionale alle esigenze date dalla disciplina, traendo anche maggiore piacere e soddisfazione dalla pratica sportiva (Robazza et al., 2022).

Allo stesso modo, il supporto dato dai compagni di squadra facilita il coping collettivo

in risposta alle richieste dell'ambiente competitivo, favorendo maggior coesione del gruppo e una migliore gestione emotiva, anche sotto pressione: si ottimizza così la performance della squadra (Carron et al., 2002; Freeman & Rees, 2010; Rees & Hardy, 2004). Negli sport di squadra vi è anche però l'aspetto del *social loafing*, ossia il fatto che gli atleti esercitino uno sforzo minore a livello di squadra per raggiungere un obiettivo rispetto allo sforzo che eserciterebbero agendo da soli (Mandolesi, 2017). Weinberg e Gould (2015) evidenziano infatti che molti allenatori concordano sul fatto che non sempre un gruppo composto dai migliori atleti forma la squadra più forte a livello competitivo. È quindi evidente che le dinamiche relazionali nello sport hanno un ruolo fondamentale nel determinare l'impegno e la motivazione di ogni atleta e risulta necessario che l'allenatore, al fine di limitare il rischio del *social loafing*, promuova un contesto di coesione di gruppo in cui gli atleti possano fornirsi reciprocamente supporto emotivo e attivino quindi un'etero-regolazione emotiva (Carron et al., 2002). Non da meno, anche il supporto da parte di persone esterne all'ambiente sportivo è un'importante fonte di regolazione emotiva: lo studio di Luo e collaboratori (2025) ha evidenziato che il supporto proveniente da famiglia e amici era associato negativamente in misura maggiore ad una riduzione dei sintomi depressivi rispetto al sostegno derivante dal team.

Le evidenze riportate suggeriscono quindi che la regolazione emotiva nello sport non possa dipendere unicamente dalle capacità individuali dell'atleta ma sia influenzata fortemente dal contesto: si ribadisce l'importanza di adottare un approccio biopsicosociale (Engel, 1977) nella regolazione emotiva, integrando le dimensioni biologiche, psicologiche e sociali e riconoscendo quindi l'importanza delle dinamiche interpersonali nella gestione funzionale del proprio vissuto emotivo (Mandolesi, 2017).

2.3.4 Autoregolazione guidata tramite feedback fisiologico e cerebrale

Un'ulteriore categoria di strategie di regolazione emotiva nello sport è l'autoregolazione guidata tramite il feedback fisiologico e cerebrale, utilizzando quindi gli strumenti di biofeedback e neurofeedback. Tali strumenti hanno la possibilità di fornire in tempo reale all'atleta informazioni sul proprio stato fisiologico, comunicando ad esempio i valori della frequenza cardiaca o della conduttanza cutanea, e cerebrale, visionando quindi l'attività elettroencefalografica, con l'obiettivo di consentire il controllo volontario e la modulazione di tali parametri (Perry et al., 2011). Generalmente, l'atleta

segue l'andamento di alcuni suoi parametri su uno schermo, acquisendo consapevolezza di ciò che gli accade dal punto di vista fisiologico e cerebrale: grazie a tale feedback l'atleta apprenderà come raggiungere in modo autonomo stati di rilassamento o di attivazione, gestendoli sulla base delle richieste dell'ambiente sportivo e attivando di conseguenza una strategia di auto-regolazione emotiva (Mandolesi, 2017). Il biofeedback e il neurofeedback, oltre che nell'ottimizzazione della performance, possono essere utili nel recupero da infortunio: tali strumentazioni permettono ad esempio di modulare lo stress fisiologico e l'ansia associati al processo riabilitativo, favorendo uno stato emotivo più funzionale al recupero (Ford et al., 2015; Rydzik et al., 2023).

Le tecniche di biofeedback e neurofeedback, che verranno approfondite nei successivi capitoli, sono quindi strumenti avanzati di regolazione emotiva che vengono spesso integrati in ambito sportivo con le strategie cognitive, comportamentali e sociali descritte precedentemente, al fine di creare programmi di ottimizzazione della performance e di recupero da infortunio con un approccio di tipo multidimensionale.

CAPITOLO 3

IL BIOFEEDBACK NELLO SPORT

3.1 Principi generali del biofeedback

Il biofeedback è una tecnica che consente all'individuo di ottenere consapevolezza e controllo su funzioni biologiche generalmente involontarie, con l'obiettivo di migliorare la salute, il benessere e la performance (Schwartz & Andrasik, 2003). Il termine "biofeedback" indica sia il processo di apprendimento sia gli strumenti utilizzati per tale processo e fu coniato nel 1969 per descrivere procedure di laboratorio degli anni Quaranta, in cui i soggetti imparavano a modificare la frequenza cardiaca, il flusso sanguigno e altre funzioni fisiologiche che non rientrano normalmente nel controllo a livello conscio (McKee, 2008). L'applicazione del biofeedback trae infatti origine dal campo della psicofisiologia, disciplina definita da Surwillo (1986) come "lo studio scientifico della relazione tra attività mentali e comportamentali ed eventi corporei". In quest'ottica psicofisiologica lo strumento del biofeedback può essere quindi compreso alla luce del principio formulato da Green e colleghi (1970), secondo cui ogni cambiamento dello stato fisiologico è accompagnato da una corrispondente modifica nello stato mentale ed emotivo e, allo stesso modo, ogni variazione mentale o emotiva è associata ad una modifica nello stato fisiologico.

Il processo di biofeedback ha inizio con la registrazione dei segnali fisiologici di interesse mediante sensori applicati sull'area cutanea da monitorare, ad esempio sul torace se l'obiettivo è quello di misurare la frequenza cardiaca. Tali segnali vengono poi trasformati in feedback visivi, uditivi e tattili, fornendo quindi all'individuo informazioni in tempo reale sul proprio stato fisiologico, con il fine di sviluppare strategie per influenzare consapevolmente tale stato fisiologico (Schwartz & Andrasik, 2003). Il training biofeedback avviene in un ambiente controllato e sotto la supervisione di un trainer specializzato, ma è fondamentale che l'individuo impari a generalizzare alla vita quotidiana le strategie apprese (Blumenstein et al., 1997).

La tecnica del biofeedback non è invasiva e si è rivelata particolarmente efficace in diversi ambiti. In ambito medico il biofeedback può essere impiegato per la gestione di

disturbi neurologici, come l'epilessia farmaco-resistente (Micoulaud-Franchi et al., 2014), e l'emicrania cronica, riducendo la frequenza, l'intensità e la durata delle cefalee di tipo tensivo (Nestoriuc & Martin, 2007). Inoltre, la letteratura fornisce numerose evidenze sull'efficacia del biofeedback come intervento complementare nella riabilitazione post-ictus, migliorando il recupero della deambulazione e il controllo posturale (Kondo et al., 2019). Il biofeedback si rivela utile anche nel trattamento di disturbi gastrointestinali, grazie al monitoraggio e alla modulazione dell'attività muscolare associata (Myung, 2010), e nella gestione dei disturbi del sonno, contribuendo a ridurre la latenza di addormentamento e a migliorare la continuità del sonno, grazie al biofeedback respiratorio (Melo et al., 2019). Il biofeedback può essere anche impiegato nella gestione dei vissuti ansiosi, favorendo la regolazione emotiva e la risposta adattiva allo stress sia in individui sani sia in pazienti con patologie croniche, attraverso il monitoraggio della variabilità della frequenza cardiaca (Goessl et al., 2017). Oltre alle applicazioni nel contesto medico, il biofeedback trova largo impiego anche in ambito sportivo, dove spesso viene utilizzato per ottimizzare la performance: ad esempio, gli atleti possono imparare a modulare la frequenza cardiaca, la respirazione e la tensione muscolare al fine di migliorare la gestione dello stress competitivo, la concentrazione e la precisione del gesto tecnico (Blumenstein, 2002). Inoltre, il biofeedback è una tecnica utilizzata anche nel recupero da infortunio, contribuendo sia al ripristino della funzionalità muscolare sia alla gestione del dolore e della percezione dello sforzo durante la riabilitazione (Haab et al., 2024).

È fondamentale precisare che il biofeedback aumenta la sua efficacia in ambito sportivo se combinato con altre tecniche di regolazione emotiva, quali le tecniche cognitive, comportamentali e sociali citate precedentemente: tale approccio integrato potenzia significativamente la performance atletica (Blumenstein et al., 2002; Beauchamp et al., 2012). Inoltre, con lo sviluppo della ricerca sul biofeedback è stato sottolineato, principalmente da Blumenstein e colleghi (2002), come sia importante scegliere la modalità di biofeedback più adatta per l'atleta in base alla disciplina sportiva, alle richieste della performance e alle condizioni di gara. La versatilità e l'efficacia del biofeedback in ambito sportivo lo rendono quindi uno strumento particolarmente appetibile per allenatori e atleti e, di conseguenza, la ricerca si dovrebbe sempre più concentrare sullo sviluppo di protocolli integrati e personalizzati, adatti per i diversi

contesti sportivi (Blumenstein & Orbach, 2014).

3.1.1 Basi teoriche e meccanismi di funzionamento

Il principio fondamentale alla base del biofeedback è che le funzioni fisiologiche autonome, normalmente non accessibili al controllo cosciente, possono essere modulate attraverso un apprendimento guidato, grazie a informazioni sul proprio stato psicofisiologico fornite in tempo reale (Schwartz & Andrasik, 2003). La registrazione di segnali fisiologici, quali la frequenza cardiaca, il ritmo respiratorio, la conduttanza cutanea o la temperatura periferica, e la loro trasformazione in feedback visivi, uditivi o tattili consentono all'individuo di prendere consapevolezza delle proprie risposte corporee e di sperimentare strategie per modificarle in modo volontario (Blumenstein et al., 2002). Il biofeedback sfrutta infatti la capacità del sistema nervoso di adattarsi agli stimoli interni ed esterni: è possibile alterare volontariamente l'equilibrio tra l'attività simpatica e parasimpatica modulando i segnali fisiologici citati precedentemente, con la possibilità di migliorare la regolazione emotiva (Schwartz & Andrasik, 2003). In ambito sportivo ciò si può tradurre in una maggiore capacità dell'atleta di gestire l'arousal pre-gara, mantenere l'attenzione durante la competizione e contemporaneamente percepire un maggiore controllo emotivo, con riduzione dell'impatto di fattori esterni stressanti (Blumenstein et al., 2002). Analogamente, l'utilizzo di elettromiografia per monitorare l'attività muscolare può essere utile negli atleti per il miglioramento del gesto tecnico, riducendo le tensioni eccessive e prevenendo sovraccarichi e infortuni (Ford et al., 2015; Shen et al., 2024).

Il processo di apprendimento tramite biofeedback si fonda su meccanismi di condizionamento operante (Frank et al., 2010), un principio fondamentale della psicologia comportamentale: Skinner (1953) dimostrò che le conseguenze delle azioni di un individuo possono modificare il suo comportamento futuro. Infatti, un rinforzo positivo, cioè uno stimolo piacevole o gratificante a seguito di un'azione, aumenta la probabilità che tale comportamento venga ripetuto in futuro, associando l'azione eseguita alla conseguenza favorevole avuta. Al contrario, l'assenza di un rinforzo positivo o la presenza di conseguenze spiacevoli tende a ridurre la probabilità che il comportamento si ripeta, favorendone l'estinzione o la modificazione.

Il condizionamento operante trova applicazione nel biofeedback nel seguente modo: i sensori fisiologici rilevano un parametro, come la tensione muscolare o la frequenza

cardiaca, e lo trasformano in tempo reale in un feedback visivo, uditivo o tattile. L'individuo, attraverso una serie di tentativi ed errori, impara a collegare strategie volontarie di autoregolazione, come il rilassamento muscolare o la respirazione controllata, alle variazioni avute nel feedback dato. Il feedback che indica un miglioramento rispetto allo stato precedente funge quindi da rinforzo positivo, aumentando la probabilità che la strategia di autoregolazione utilizzata venga mantenuta e consolidata (Horowitz, 2006). Nel corso degli anni il biofeedback ha permesso di superare l'idea che le funzioni autonome sono completamente al di fuori del controllo volontario, aprendo la strada alle applicazioni di tale tecnica in ambito clinico e sportivo.

Una delle più importanti dimostrazioni sperimentali sulla possibilità di modificare volontariamente le funzioni autonome fu condotta da Di Cara e Miller (1968) su ratti curarizzati, i quali imparavano a controllare parametri cardiovascolari ricevendo un rinforzo associato a feedback in tempo reale: essi infatti erano in grado di modulare la propria frequenza cardiaca al fine di evitare lievi scosse elettriche. Nonostante l'impatto iniziale di questi risultati, la validità dello studio fu ridimensionata negli anni successivi: lo stesso Miller riconobbe la difficoltà nel replicare i risultati ottenuti in precedenza (Miller & Dworkin, 1974; Dworkin & Miller, 1986). La controversia metodologica principale è nell'azione del curaro, il quale agisce esclusivamente sulle giunzioni neuromuscolari, quindi tra i nervi somatici efferenti e i muscoli scheletrici, non riuscendo ad isolare le vie centrali autonome da quelle scheletriche (Obrist et al., 1974). Di conseguenza, se un pattern motorio generato centralmente è ordinariamente associato ad una risposta autonoma, l'attivazione di tale pattern porterà alla manifestazione dell'aspetto viscerale pur senza la comparsa di quello somatico (Dworkin & Miller, 1986).

In quegli stessi anni negli Stati Uniti le ricerche relative al biofeedback si stavano realizzando anche su soggetti umani, rinforzando l'idea della possibilità di controllare volontariamente la propria attività cardiaca. Per esempio, Weiß e Engel (1971) condussero uno studio su pazienti affetti dall'anomalia cardiaca delle contrazioni ventricolari premature, dimostrando che tutti i pazienti riuscivano ad esercitare un certo grado di controllo sulla propria frequenza cardiaca e a ridurre quindi le contrazioni ventricolari premature, grazie alla mediazione della diminuzione del tono simpatico e

dall'aumento del tono vagale. Gli autori dimostrarono inoltre che in alcuni pazienti la diminuzione della frequenza delle contrazioni ventricolari premature si manteneva fino a 21 mesi, evidenziando come l'apprendimento del controllo cardiovascolare volontario possa portare a modificazioni clinicamente significative nelle funzioni cardiache.

Oltre al biofeedback dei parametri cardiovascolari che stava pian piano acquisendo importanza a livello clinico, Budzynski e Stoyva (1969) svilupparono uno dei primi dispositivi di biofeedback elettromiografico: impiegando elettrodi in grado di misurare l'attività muscolare e di trasformarla in segnali uditivi, i soggetti riuscivano a raggiungere un livello di rilassamento muscolare più profondo rispetto al gruppo di controllo che non riceveva feedback o riceveva feedback irrilevanti. Tale strategia di rilassamento muscolare assume particolare importanza se si pensa che può avere effetti sulla componente simpatica del sistema nervoso autonomo, teoria ipotizzata dagli autori e confermata da studi successivi. Benson e colleghi (1974) e McGrady e colleghi (1981) hanno infatti precisato che le tecniche di rilassamento portano ad una riduzione dell'attivazione simpatica, evidenziata da una diminuzione della frequenza cardiaca, della pressione arteriosa e dell'attività metabolica. Studi più recenti hanno inoltre dimostrato un incremento della variabilità della frequenza cardiaca in seguito a strategie di rilassamento muscolare, suggerendo un miglioramento della flessibilità neuroviscerale e una maggiore capacità di adattamento agli stressor ambientali (Gross & Kohlmann, 2021). Tali evidenze confermano che gli interventi volontari attraverso il sistema somatico possono modulare di conseguenza funzioni fisiologiche autonome, ampliando le possibilità di intervento degli strumenti di biofeedback.

Negli anni Settanta l'interesse per il biofeedback si estese ad ulteriori parametri fisiologici, come la temperatura cutanea periferica e la respirazione. Alcuni studi pionieristici (Taub & Emurian, 1976; Keefe, 1975, 1978; Keefe & Gardner, 1979) dimostrarono che i soggetti erano in grado di modificare la temperatura delle proprie dita tramite un feedback di tipo termico. La revisione critica della letteratura di King e Montgomery (1980) confermò l'evidenza che piccoli ma significativi aumenti della temperatura delle dita possono essere generalmente prodotti da soggetti normali utilizzando strumentazioni di biofeedback termico. Inoltre, tale cambiamento di temperatura dopo il training biofeedback può essere mantenuto nel tempo (Keefe, 1978), prodotto anche in assenza di un feedback (Shouse et al., 1979) e al di fuori del

laboratorio (Freedman & Ianni, 1983).

Lo studio di Freedman e collaboratori (1988) dimostrò che il biofeedback termico induce la vasodilatazione e ha di conseguenza effetto sulla temperatura periferica corporea, accompagnata da una modifica nella conduttanza cutanea e nella frequenza cardiaca. Gli autori evidenziano che tale meccanismo è mediato dal sistema nervoso simpatico efferente e rappresenta quindi una via efficace per la regolazione dello stress fisiologico.

Negli stessi anni la ricerca pose le basi per lo sviluppo successivo dei protocolli di biofeedback respiratorio, che permettono di sincronizzare atti respiratori e battito cardiaco. Tali tecniche sfruttano l'aritmia sinusale respiratoria, ossia la fisiologica oscillazione della frequenza cardiaca in base alla respirazione, fenomeno già osservato nel secolo precedente da Ludwig (1847), e mirano a potenziare l'attivazione parasimpatica e a favorire stati di rilassamento e regolazione emotiva (Lehrer et al., 1980; Elghozi et al., 1991).

Gli studi fino ad ora citati dimostrarono che funzioni fisiologiche considerate in precedenza esclusivamente autonome potevano essere modulate attraverso processi di apprendimento mediati dal feedback. Tali studi superarono quindi la concezione dicotomica tra sistema volontario e autonomo, fornendo una base sperimentale al modello di autoregolazione psicofisiologica e ai successivi protocolli di biofeedback, sempre più frequentemente basati sull'integrazione multimodale di più parametri fisiologici (Schwartz & Andrasik, 2003).

Un elemento centrale di tali protocolli di biofeedback è lo sviluppo della consapevolezza interocettiva, quindi la capacità dell'individuo di percepire, interpretare e integrare i propri segnali fisiologici interni (Weerdmeester et al., 2020). Il biofeedback semplifica infatti questo processo, rendendo accessibili segnali fisiologici normalmente non percepiti in modo cosciente e favorendo una discriminazione degli stati interni (Wareing et al., 2024). Tale miglioramento della consapevolezza è un requisito fondamentale per il corretto apprendimento dell'autoregolazione tramite biofeedback, consentendo all'individuo di associare specifiche tecniche di regolazione emotiva alle variazioni osservate nei parametri fisiologici e di attuarle quindi in futuro in autonomia (Lazzarelli et al., 2024).

La relazione tra la consapevolezza interocettiva e la capacità di regolazione emotiva è

supportata da evidenze neurofisiologiche: una maggiore consapevolezza interocettiva è associata ad una riduzione dell'arousal disfunzionale e ad un maggior adattamento agli stressor (Thayer & Lane, 2000). Il biofeedback non agisce solo a livello periferico, ma promuove anche modificazioni funzionali a livello dei circuiti neurali coinvolti nell'integrazione tra segnali corporei, processi cognitivi ed emozionali (Wareing et al., 2024). Tali modificazioni si verificano nelle strutture delle reti interocettive: l'insula traduce le informazioni fisiologiche in consapevolezza soggettiva dello stato corporeo, la corteccia cingolata facilita l'attenzione verso tali stati interni e la modulazione delle risposte autonome, mentre l'amigdala contribuisce alla regolazione delle risposte emotive in base ai segnali corporei (Critchley et al., 2004; Craig, 2009).

Ripetute sessioni di training biofeedback sembrano inoltre favorire processi di plasticità neurale, attraverso i quali le abilità di autoregolazione apprese verrebbero progressivamente consolidate e automatizzate (Pandria et al., 2018). La ripetizione dell'associazione tra strategie di autoregolazione e cambiamenti fisiologici osservati rafforza infatti i circuiti neurali coinvolti, riducendo gradualmente la necessità di un feedback esterno e consentendo il trasferimento di tali abilità di autoregolazione in contesti al di fuori del laboratorio (Blumenstein et al., 2002). Il trasferimento delle abilità di autoregolazione è particolarmente utile in situazioni ad alto contenuto emotivo come le competizioni sportive, dove la gestione di stress e arousal può ottimizzare la performance (Pusenjak et al., 2015), o nei percorsi di riabilitazione post-infortunio, dove l'autoregolazione può favorire un recupero più efficace ed immediato (Rollo et al., 2017).

3.1.2 Parametri rilevati e tipi di biofeedback

Nel biofeedback i parametri rilevati sono gli indicatori attraverso i quali l'individuo riceve informazioni sul proprio stato fisiologico, avendo quindi la possibilità di sviluppare progressivamente strategie di autoregolazione. In ambito sportivo, così come negli altri contesti in cui il biofeedback viene impiegato, la scelta dei parametri da rilevare è personalizzata: la tipologia di biofeedback da utilizzare è scelta sulla base delle caratteristiche individuali dell'atleta e situazionali della disciplina, unitamente al tipo di obiettivo da perseguire, il quale può essere l'ottimizzazione della performance, la prevenzione dell'infortunio o il supporto al recupero psicofisico (Blumenstein et al., 2002; Blumenstein & Orbach, 2014).

I parametri più frequentemente rilevati nel biofeedback riguardano l'attività elettromiografica, cardiaca, respiratoria ed elettrodermica (Schwartz & Andrasik, 2003). La possibilità di integrare più parametri in un protocollo biofeedback consente di ottenere una rappresentazione maggiormente completa dell'attività psicofisiologica dell'individuo, favorendo quindi un intervento individualizzato (Blumenstein & Orbach, 2014).

L'elettromiografia (EMG) misura l'attività elettrica associata alla contrazione delle fibre muscolari: attraverso elettrodi posizionati sui distretti muscolari di interesse è possibile registrare l'intensità e la durata dell'attivazione muscolare, trasformandole in segnali visivi o uditivi che permettono all'individuo di apprendere a modulare volontariamente il livello di attivazione muscolare (Schwartz & Andrasik, 2003). In ambito sportivo il biofeedback EMG viene impiegato sia per ridurre un'iperattivazione muscolare che può compromettere la precisione del gesto tecnico, sia per ottimizzare i pattern di attivazione muscolare, utili alla stabilità articolare e alla produzione della forza richiesta dalla disciplina (Blumenstein et al., 2002).

L'elettrocardiografia (ECG) consente di rilevare l'attività elettrica generata dal cuore attraverso parametri quali la frequenza cardiaca (HR), ossia il numero di battiti del cuore al minuto, e la variabilità della frequenza cardiaca (HRV), cioè la misura della variazione dell'intervallo tra un battito e il successivo (Thayer et al., 2012). L'HRV è considerata un indicatore della modulazione efficiente dell'attività cardiaca da parte del SNA: nello specifico, l'influenza parasimpatica mediata dal nervo vago favorisce una maggiore flessibilità battito-per-battito, la quale permette un miglior adattamento alle richieste ambientali e si associa ad una maggiore capacità di regolazione emotiva e di resilienza allo stress (Thayer & Lane, 2000). La misura della HRV assume quindi un significato particolare: una HRV elevata, entro limiti fisiologici, si associa ad un miglior stato di salute generale, dato che l'organismo si adatta agli stimoli interni ed ambientali (Lehrer et al., 2003), e una HRV bassa è associata a un aumentato rischio di disturbi cardiovascolari e metabolici ed è correlata ad un rischio più elevato di mortalità (Buccelletti et al., 2009; da Silva et al., 2016). Nel contesto sportivo il biofeedback HRV viene utilizzato per migliorare negli atleti la gestione dell'arousal pre-gara, favorire stati di concentrazione e promuovere processi di recupero più rapidi ed efficaci (Paul & Garg, 2012; Perez-Gaido et al., 2021). Inoltre, i benefici del biofeedback HRV

sono stati osservati anche attraverso studi su allenatori e altro personale del contesto sportivo, i quali devono affrontare livelli elevati di stress e richieste impegnative nel loro ambiente di lavoro (Gross et al., 2016).

La pneumografia consente di rilevare parametri quali la frequenza respiratoria, l'ampiezza degli atti respiratori e la loro variabilità, fornendo quindi informazioni sulla qualità della respirazione e sui relativi cambiamenti in relazione ai diversi stati emotivi e cognitivi (Jerath et al., 2006). La respirazione è una delle funzioni fisiologiche autonome che possono essere facilmente controllate in modo volontario ed è quindi un canale privilegiato negli interventi di autoregolazione psicofisiologica: attraverso il biofeedback respiratorio l'individuo può apprendere in modo più efficace a regolare i propri pattern respiratori (Lehrer & Gevirtz, 2014).

Dal punto di vista neurofisiologico, infatti, la respirazione influisce direttamente sull'attività parasimpatica vagale del sistema nervoso autonomo, attraverso meccanismi come l'aritmia sinusale respiratoria (Lehrer et al., 2000). L'aritmia sinusale respiratoria è il fenomeno fisiologico per cui vi è una variazione ciclica della frequenza cardiaca in sincronia con l'atto respiratorio, con un incremento della frequenza cardiaca durante l'inspirazione e una riduzione di essa durante l'espirazione; tale fenomeno riflette quindi l'influenza del nervo vago sul nodo senoatriale (Berntson et al., 1997). Tale meccanismo evidenzia come la respirazione, pur essendo tipicamente una funzione autonoma, possa essere modulata al fine di modificare l'attività cardiovascolare e favorire di conseguenza l'adattamento psicofisiologico. In ambito sportivo il biofeedback respiratorio viene infatti utilizzato per la regolazione dell'arousal pre-gara (Jimenez Morgan & Molina Mora, 2017). I benefici osservati nella performance sportiva grazie al training con biofeedback respiratorio sembrano essere dovuti anche alla capacità dell'atleta di concentrare l'attenzione sulla propria frequenza respiratoria e conseguentemente di diminuire l'attenzione verso le interferenze esterne (Nideffer, 1989), come gli spettatori e i rumori dell'ambiente circostante (Jimenez Morgan & Molina Mora, 2017). Inoltre, la respirazione lenta e controllata si associa ad una maggiore efficienza ventilatoria e ad un minor consumo di ossigeno a parità di sforzo fisico, favorendo quindi un miglioramento della resistenza alla fatica (Boro et al., 2025). L'attività elettrodermica misura le variazioni nelle proprietà di conduttanza elettrica della pelle, modificate in risposta alla sudorazione: tali cambiamenti riflettono l'attività

del sistema nervoso autonomo, in particolare della componente simpatica, che regola le secrezioni delle ghiandole sudoripare in relazione allo stato di attivazione dell'individuo (Dawson et al., 2007). Nel contesto del biofeedback, l'attività elettrodermica consente quindi agli individui di apprendere a riconoscere e a modulare volontariamente la propria attivazione: il biofeedback termico utilizza come parametro fisiologico target la temperatura cutanea periferica, solitamente misurata con sensori posizionati sulle dita delle mani o dei piedi (Schwartz & Andrasik, 2003). Tale temperatura varia in funzione del ramo del SNA attivato: l'attività simpatica provoca infatti vasocostrizione e conseguente riduzione della temperatura periferica, mentre l'attivazione parasimpatica porta alla vasodilatazione e all'aumento della temperatura periferica (Hall & Hall, 2020). Il biofeedback termico può quindi essere utile nella promozione di stati di rilassamento, riducendo l'attivazione simpatica e favorendo la vasodilatazione periferica (Freedman, 1991): i sensori applicati alle estremità corporee forniscono un feedback in tempo reale, consentendo all'individuo di apprendere, attraverso prove ed errori, strategie di autoregolazione (come tecniche di rilassamento, respirazione controllata o imagery) per aumentare volontariamente la temperatura periferica e ridurre l'attivazione autonoma legata allo stress (McKee, 2008). In ambito sportivo il biofeedback termico si è rivelato utile anche nel miglioramento cognitivo degli atleti, in particolare nell'attenzione sostenuta, che si traduce in maggiore concentrazione e controllo emotivo durante la competizione (Makaracı & Makaracı, 2025). Oltre a questo, il biofeedback termico porta a miglioramenti in altre funzioni cognitive, quali l'inibizione e la memoria di lavoro, fondamentali per la performance sportiva (Makaracı et al., 2024; Vaughan & Laborde, 2021). Ottimizzando la capacità di modulare l'attività elettrodermica, gli atleti possono migliorare la regolazione autonoma, fondamentale per mantenere la calma in contesti di alta pressione come la competizione (Makaracı & Makaracı, 2025). Inoltre, una pratica costante di tale biofeedback può rafforzare i percorsi neurali e favorire un sistema di risposta allo stress maggiormente adattivo, contribuendo a miglioramenti a lungo termine nella resilienza e nella salute dell'atleta (Makaracı et al., 2024).

I parametri elettromiografici, elettrocardiaci, respiratori ed elettrodermici consentono quindi di intervenire su differenti dimensioni della regolazione psicofisiologica dell'atleta, risultando efficaci sia nell'ottimizzazione della performance sia nel recupero da infortunio: l'applicazione integrata di più segnali fisiologici nel biofeedback consente

di realizzare interventi maggiormente efficaci per l'ottimizzazione della performance e il recupero da infortunio (Blumenstein & Hung, 2016).

3.1.3 Strumenti utilizzati

Gli strumenti utilizzati nel biofeedback consistono in apparecchiature progettate per l'acquisizione dei parametri psicofisiologici, costituite quindi da sensori, amplificatori, convertitori e software dedicati all'elaborazione in tempo reale dei segnali fisiologici rilevati (Schwartz & Andrasik, 2003). Per la registrazione dell'attività elettromiografica ed elettrocardiografica vengono utilizzati elettrodi di superficie, applicati corrispondentemente sulla cute dei gruppi muscolari di interesse o in specifiche derivazioni toraciche, al fine di rilevare le variazioni dei potenziali elettrici generati dall'attività muscolare e cardiaca (McKee, 2008). Per la rilevazione dell'attività respiratoria vengono invece impiegate fasce pneumografiche toraciche e addominali, in grado di rilevare le variazioni di espansione del torace e dell'addome durante il ciclo respiratorio, e flussimetri nasali, i quali rilevano il flusso di aria inspirato ed espirato e stimano dunque il volume corrente polmonare (Delk et al., 1994; Lehrer et al., 2004). L'attività elettrodermica è registrata mediante l'uso di sensori di conduttanza cutanea, posizionati generalmente sulle dita delle mani e in grado di misurare la variazione della conduttanza elettrica della pelle in risposta all'attivazione del sistema nervoso autonomo (Nagai et al., 2019).

I dati fisiologici raccolti dalle strumentazioni appena descritte vengono poi trasformati in feedback comprensibili all'individuo, creando dei segnali di tipo visivo, uditivo o tattile (Schwartz & Andrasik, 2003). Tali segnali permettono di ricevere informazioni in tempo reale sul proprio stato fisiologico, favorendo la consapevolezza interocettiva e il controllo autonomico (Weerdmester et al., 2020).

I feedback visivi sono tra i più utilizzati: l'individuo può osservare barre, diagrammi o grafici su uno schermo, i quali cambiano in tempo reale in base all'andamento del segnale fisiologico coinvolto (Schwartz, 2018). Alcuni protocolli utilizzano la variazione dell'intensità o della tonalità dei colori come indicazioni dell'evoluzione del segnale fisiologico (Frank et al., 2010; Casellato et al., 2012) oppure animazioni interattive, come ad esempio un avatar a figura intera, le quali si trasformano secondo le risposte corporee e rendono ancora più intuitiva la comprensione del proprio stato interno (Roonsik et al., 2015).

Un approccio innovativo nel biofeedback è l'impiego dei *serious games*: nello studio di Estrella e colleghi (2023) gli individui controllavano attraverso la loro frequenza cardiaca un personaggio sullo schermo, muovendolo verticalmente per evitare gli ostacoli. Tale metodo ludico favorisce l'apprendimento di strategie di autoregolazione, aumentando la motivazione e il coinvolgimento degli individui e facilitando la ripetizione, il consolidamento e l'automatizzazione delle tecniche acquisite, potendo quindi trasferirle anche in contesti al di fuori del laboratorio (Estrella et al., 2023).

I feedback uditivi comprendono tutti quei segnali sonori che possono variare in frequenza, volume o ritmo in base all'andamento del parametro misurato (Schwartz & Andrasik, 2003). Questi segnali permettono all'individuo di percepire immediatamente le variazioni fisiologiche anche ad occhi chiusi o senza distogliere lo sguardo da un altro compito in esecuzione (Shaykevich et al., 2015): si pensi ad esempio ad un atleta che utilizza i feedback uditivi per modulare la frequenza cardiaca o il tono muscolare durante l'esecuzione di un gesto tecnico complesso, senza avere la necessità di direzionare lo sguardo ad uno schermo.

I feedback tattili forniscono informazioni all'individuo sul proprio stato fisiologico attraverso vibrazioni trasmesse da piccoli dispositivi indossabili dall'individuo; tali dispositivi possono essere applicati in diverse aree corporee, come il polso (Choi & Ishii, 2020) o la lingua (Vuillerme et al., 2007). Lo studio di Choi e Ishii (2020) ha evidenziato che il feedback tattile era più efficace e rapido nella regolazione della frequenza cardiaca rispetto ai feedback visivi e uditivi, suggerendo il potenziale del biofeedback tattile come strumento contemporaneamente efficiente e discreto per la regolazione autonoma.

Negli ultimi anni l'innovazione tecnologica ha infatti permesso di trasferire le tecniche di biofeedback al di fuori del laboratorio attraverso l'uso di dispositivi portatili, chiamati *wearable devices*, collegati anche ad applicazioni *mobile* (Dillon et al., 2016; Franco et al., 2012; Schumann et al., 2019). Tali applicazioni permettono agli individui di ricevere feedback sul proprio stato fisiologico in tempo reale durante qualsiasi attività quotidiana, permettendo un'integrazione al biofeedback realizzato in laboratorio (Zhang et al., 2010). Ad esempio, *wearable devices* come i dispositivi a braccialetto (Choi & Ishii, 2020) e ad anello (Browne et al., 2021) o i patch cutanei (Chung et al., 2021) possono rilevare in modo discreto i parametri fisiologici di interesse, i quali vengono

poi trasformati in feedback comprensibili all'individuo e visualizzabili sull'applicazione *mobile* (Son et al., 2023).

Pur offrendo la comodità e la praticità di un utilizzo quotidiano i *wearable devices* non sostituiscono il training biofeedback effettuato in laboratorio, dove è possibile ottenere una misurazione maggiormente precisa di una varietà di parametri fisiologici in condizioni controllate (Nelson et al., 2020). L'ambiente controllato del laboratorio permette infatti di ridurre le interferenze esterne e di standardizzare le modalità di rilevazione, facilitando la valutazione degli effetti dei protocolli di training biofeedback (Schwartz & Andrasik, 2003). Parallelamente, i *wearable devices* permettono invece la raccolta continua e su larga scala di dati fisiologici in contesti al di fuori del laboratorio, favorendo il monitoraggio a lungo termine dello stato di salute psicofisico dell'individuo in condizioni di vita reale (Nelson et al., 2020).

L'utilizzo combinato di strumenti di laboratorio e dispositivi portatili sembra quindi essere la strategia migliore per l'apprendimento e il consolidamento delle strategie di autoregolazione tramite biofeedback: le misurazioni effettuate in laboratorio assicurano la precisione e la validazione dei protocolli, mentre i *wearable devices* consentono la generalizzazione del training biofeedback alla vita quotidiana (Nelson et al., 2020).

In ambito sportivo tale integrazione è particolarmente vantaggiosa: i training effettuati in laboratorio permettono di sviluppare strategie di autoregolazione ottimizzate per l'atleta, mentre l'uso di dispositivi portatili consente di applicarle anche durante gli allenamenti e nel contesto pre-gara, migliorando ad esempio il controllo dell'arousal, della concentrazione e della resilienza allo stress (Giraldo-Pedroza et al., 2020; Jimenez Morgan & Molina Mora, 2017; Kos et al., 2019). Inoltre, il training biofeedback accompagnato dai *wearable devices* può svolgere un ruolo importante anche nel recupero da infortunio, permettendo all'atleta di monitorare e regolare in autonomia i propri parametri fisiologici sia durante le sessioni di riabilitazione sia nel follow-up quotidiano a casa (Argent et al., 2019; Bowman et al., 2021; Giggins et al., 2013).

3.2 Applicazioni del biofeedback per la performance sportiva

La performance sportiva non dipende solamente dalle capacità fisiche dell'atleta, ma anche dalla gestione ottimale delle risorse psicofisiologiche: la regolazione dell'arousal,

il controllo della tensione muscolare, la gestione della fatica e l'efficacia del recupero post-competizione sono fattori fondamentali che influenzano la precisione dei gesti tecnici, la coordinazione motoria e la capacità di sostenere elevati livelli di sforzo fisico e mentale nel tempo (Weinberg & Gould, 2015; Enoka & Duchateau, 2016; Kellmann et al., 2018). Se tali elementi vengono compromessi, la prestazione può essere danneggiata, a causa della riduzione della capacità di rispondere adeguatamente agli stimoli competitivi, e si aumenta inoltre il rischio di infortuni (Edwards, 2018; Meeusen et al., 2012).

In tale contesto il biofeedback è quindi uno strumento efficace per la modulazione volontaria dei processi psicofisiologici collegati alla performance. Infatti, i protocolli HRV favoriscono un incremento della modulazione vagale e una migliore regolazione dell'equilibrio simpato vagale attraverso la respirazione guidata, la quale influenza la variabilità della frequenza cardiaca (Perez-Gaido et al., 2021). Il biofeedback elettromiografico, invece, consente all'atleta di monitorare in tempo reale l'attivazione muscolare e di rilassare in modo selettivo i muscoli antagonisti o non coinvolti nel gesto tecnico, ottimizzando così l'esecuzione e migliorando la coordinazione motoria (Merletti & Farina, 2016; French, 1980; Dos Anjos et al., 2024).

L'uso combinato dei protocolli di biofeedback è utile anche per favorire un recupero, sia fisiologico sia psicologico, più rapido ed efficace negli atleti (Lehrer & Eddie, 2013; Brown & Bray, 2019; Beckmann & Elbe, 2015). In particolare, il biofeedback permette all'atleta di ripristinare più rapidamente le proprie risorse psicofisiche, migliorando la prontezza mentale, la precisione tecnica e la capacità di sostenere sforzi prolungati (Perez-Gaido et al., 2021; Yilmaz et al., 2025).

Il biofeedback è quindi uno strumento versatile per l'ottimizzazione della performance, permettendo di intervenire su molteplici aspetti del rendimento sportivo; le principali applicazioni del biofeedback finalizzate al miglioramento della performance verranno di seguito approfondite.

3.2.1 Regolazione dell'arousal prima e durante la competizione

Storicamente, il costrutto di arousal è stato oggetto di una certa ambiguità terminologica, venendo spesso usato in modo intercambiabile con altri termini come ansia, emozione, motivazione o energia psichica (Martens, 1977; Spielberger, 1972).

Successivamente si è evidenziata invece la necessità di una distinzione concettuale più precisa: ad oggi l'arousal è definito come un costrutto multidimensionale che include l'aspetto fisiologico associato a dimensioni cognitive, affettive e comportamentali (Zaichkowsky & Naylor, 2004).

La regolazione dell'arousal è un aspetto fondamentale nella performance sportiva: un atleta con un livello ottimale di arousal riesce infatti a combinare una risposta fisiologica equilibrata alla concentrazione e prontezza mentale, mantenendo uno stato emotivo stabile e regolando efficacemente il comportamento in gara (Weinberg & Gould, 2015). In questo contesto il biofeedback è uno strumento adeguato per promuovere la consapevolezza e la modulazione volontaria degli stati fisiologici associati all'arousal nell'atleta, favorendo l'equilibrio tra il sistema simpatico e parasimpatico. Jimenez Morgan e Molina Mora (2017) hanno evidenziato che il biofeedback HRV portava ad un miglioramento della prestazione sportiva. Oltre al miglioramento generale della performance, il biofeedback consente un controllo dell'arousal in funzione delle esigenze specifiche della competizione sportiva in atto: l'atleta può infatti diminuire l'arousal in discipline che richiedono precisione e calma, come il tiro con l'arco, oppure aumentarlo in sport che richiedono esplosività e vigore, ad esempio uno sport di contatto (Lehrer et al., 2020; Blumenstein & Orbach, 2014).

Lo studio di Paul e Garg (2012), ampiamente citato in letteratura, ha dimostrato che la somministrazione del biofeedback HRV a giocatori di basket determinava significative modificazioni nei livelli di ansia, nell'autoefficacia di coping, nel ritmo respiratorio e nella performance, con miglioramenti nei palleggi, passaggi e tiro. Tali risultati confermano che il biofeedback permette di regolare volontariamente parametri dello stato di arousal, traducendosi in un migliore equilibrio tra attivazione fisiologica, capacità cognitive e controllo emotivo e di conseguenza un'ottimizzazione della performance.

3.2.2 Controllo della tensione muscolare nel gesto tecnico

Il biofeedback HRV può essere utile nel favorire una regolazione più funzionale dell'attivazione neurofisiologica e della coordinazione motoria nel gesto tecnico: la revisione di Padaguan e colleghi (2020), condotta analizzando studi su atleti di diverse discipline come basket, danza, corsa e calcio, ha indagato questa possibilità. I risultati hanno mostrato una certa eterogeneità, dovuta probabilmente a differenze

metodologiche tra gli studi analizzati, tra cui la durata dei protocolli di biofeedback, la diversa natura delle discipline prese in considerazione e le caratteristiche degli atleti come età e genere. In particolare, la diversa distribuzione di genere nei campioni potrebbe aver influenzato i risultati non significativi. Alcuni studi suggeriscono, infatti, la presenza di differenze medie nei tempi di reazione tra uomini e donne, possibilmente riconducibili all'impiego di diverse strategie di elaborazione cognitiva. In tali studi gli individui di sesso maschile tendono a mostrare tempi di risposta più brevi rispetto a quelli di sesso femminile (Dane & Erzurumluoglu, 2003). Tale differenza può essere spiegata dal fatto che le donne hanno una maggiore quantità di estrogeni, la quale migliora l'assorbimento della colina e la sintesi dell'acetilcolina, aumentando così l'attività vagale (Dart et al., 2002): le donne hanno quindi risposte più controllate ma leggermente più lente rispetto agli uomini. Oltre alle differenze di genere, anche il livello di abilità dell'atleta influenza i tempi di reazione: atleti élite hanno tempi di reazione più brevi rispetto agli atleti non-élite (Verburgh et al., 2016).

Padaguan e colleghi (2020) specificano quindi che tutti questi elementi possono aver inciso sull'evidenza dei benefici del biofeedback HRV trasferiti all'ottimizzazione del gesto tecnico; nonostante questo, dalla revisione emerge una tendenza generalmente favorevole all'uso del biofeedback per migliorare l'abilità motoria complessiva negli atleti. Gli autori interpretano tali miglioramenti nelle abilità motorie alla luce del modello dell'integrazione neuroviscerale (Porges, 2009; Thayer & Lane, 2009): il biofeedback HRV aumenterebbe l'attivazione del nervo vago (Lehrer & Gevirtz, 2014), il quale è collegato alla corteccia cingolata anteriore e ha quindi un ruolo fondamentale nei comportamenti multi-componenti (Thayer et al., 2009). Inoltre, il biofeedback HRV potrebbe facilitare la produzione di neurotrasmettitori responsabili del miglioramento di funzioni motorie, ottenendo un perfezionamento nei gesti tecnici grazie alla riduzione della tensione muscolare disfunzionale; tale distensione è infatti ottenuta dall'attivazione del sistema parasimpatico (Padaguan et al., 2020).

Oltre al biofeedback HRV, il biofeedback può essere applicato direttamente a livello muscolare utilizzando i protocolli elettromiografici (Merletti & Farina, 2016; Giggins et al., 2013). Tali protocolli permettono di visualizzare in tempo reale la propria attività elettromiografica, fornendo informazioni sull'attivazione dei singoli muscoli e potendo quindi individuare contrazioni muscolari eccessive o non necessarie al gesto tecnico in

questione (French, 1980). La percezione cosciente della tensione muscolare attiva circuiti cortico-sottocorticali che modulano il segnale motore discendente ai motoneuroni alfa, favorendo un rilassamento selettivo dei muscoli antagonisti o non coinvolti nel gesto tecnico e riducendo le co-contrazioni inefficaci (De Luca, 1997). La co-contrazione muscolare, ossia l'attivazione simultanea di muscoli agonisti e antagonisti che controllano la stessa articolazione, rende il sistema articolare maggiormente stabile e in grado di resistere a perturbazioni bidirezionali (Latash, 2018). Il vantaggio della co-contrazione è infatti il tempo di latenza brevissimo in seguito ad una perturbazione grazie alla risposta esclusivamente meccanica, senza mediazione dal sistema nervoso centrale (De Luca & Mambrito, 1987). Tuttavia, quando è in atto una co-contrazione vi è una diminuzione della qualità dell'atto motorio: il sistema diventa rigido e si riduce la fluidità e la precisione del movimento (De Luca, 1997). Riducendo le co-contrazioni muscolari inefficaci tramite l'uso del biofeedback elettromiografico è quindi possibile migliorare la coordinazione e l'efficienza del gesto tecnico (French, 1980).

3.2.3 Riduzione della fatica negli sport di resistenza

Secondo Enoka e Duchateau (2016) la fatica dovrebbe essere concettualizzata considerando due diversi elementi: l'affaticamento da prestazione, ossia il declino oggettivo della capacità di eseguire una determinata attività fisica (Abbiss et al., 2015), e l'affaticamento percepito, quindi la percezione soggettiva di stanchezza, dolore o debolezza (Enoka & Duchateau, 2016). L'affaticamento da prestazione riflette la riduzione effettiva della capacità di generare forza e mantenere la prestazione da parte dell'apparato muscolare ed è infatti determinato sia dalla ridotta attivazione dei muscoli sia dalla diminuzione della loro capacità contrattile. L'affaticamento percepito è invece modulato sia da fattori fisiologici relativi all'omeostasi, come glicemia, temperatura corporea, idratazione e ossigenazione, sia da componenti psicologiche come umore, motivazione, aspettative e feedback sulla performance (Enoka & Duchateau, 2016). Tale inquadramento teorico porta a sottolineare come la fatica non sia un elemento unidimensionale ma comprenda elementi centrali e periferici, generandosi appunto dalla complessa interazione tra funzioni muscolari e stato psicologico e omeostatico dell'individuo. Negli sport, soprattutto nelle discipline di resistenza, la fatica è un fattore limitante della prestazione, in quanto influenza sia l'efficienza biomeccanica sia

la capacità di mantenere un'elevata intensità di sforzo nel tempo (Noakes, 2008). Inoltre, è fondamentale considerare che la fatica riduce la capacità di mantenere correttamente il gesto tecnico e aumenta dunque il rischio di infortuni (Edwards, 2018; Enoka & Duchateau, 2008). È quindi essenziale sviluppare strategie che mirino ad agire sulle componenti fisiologiche e psicologiche legate alla fatica, permettendo di migliorare la gestione dello sforzo e la performance complessiva: il biofeedback risulta essere uno strumento con grandi potenzialità adatte a questo scopo.

I protocolli di biofeedback HRV basati su tecniche di respirazione guidata aumentano la variabilità della frequenza cardiaca, migliorando la sensibilità baroriflessa e ottimizzando la regolazione autonoma cardiovascolare (Lehrer et al., 2003). Tale miglioramento nell'autoregolazione fisiologica può contribuire a modulare la percezione soggettiva dello sforzo, ossia l'affaticamento percepito, permettendo agli atleti di prolungare la performance ottimale. Brown e Bray (2019) hanno infatti dimostrato che la ricezione di feedback sulla propria frequenza cardiaca durante un esercizio fisico ad alta intensità attenua gli effetti negativi dell'affaticamento mentale sulla performance, confermando l'ipotesi riguardo al biofeedback come moderatore nella relazione tra l'affaticamento mentale e la performance nelle attività fisiche ad alta intensità.

Oltre al biofeedback HRV, anche i protocolli elettromiografici possono consentire agli atleti di modulare la percezione della fatica: monitorando in tempo reale l'attività dei muscoli coinvolti nel gesto tecnico è possibile ottimizzare la coordinazione tra muscoli agonisti e antagonisti (Merletti & Farina, 2016; Giggins et al., 2013), avendo effetti indiretti sull'affaticamento percepito. Per esempio, lo studio di Dos Anjos e colleghi (2024) ha dimostrato che l'uso di biofeedback EMG durante un esercizio di remata consentiva ai partecipanti di modulare volontariamente l'attivazione del muscolo trapezio inferiore, riducendo l'intensità di circa il 10% rispetto all'esecuzione senza feedback. Tale attivazione più efficiente del muscolo coinvolto permette all'atleta di evitare contrazioni eccessive o inutili, riducendo potenzialmente l'affaticamento muscolare durante l'esercizio. Sebbene la letteratura attuale sull'applicazione del biofeedback finalizzato alla riduzione della fatica presenti evidenze ancora limitate e preliminari, i risultati degli studi precedentemente citati suggeriscono che tale strumento abbia le potenzialità per ridurre indirettamente la percezione dello sforzo attraverso il

controllo della frequenza cardiaca (Lehrer et al., 2003; Brown & Bray, 2019) e per diminuire l'affaticamento muscolare attraverso il controllo del tono muscolare (Merletti & Farina, 2016; Giggins et al., 2013; Dos Anjos et al., 2024).

3.2.4 Facilitazione del recupero fisico post-competizione

Il recupero è un processo rigenerativo per cui nell'individuo viene ripristinato l'equilibrio dell'organismo, ristabilendo le risorse impiegate in uno sforzo fisico e/o mentale (Kellmann et al., 2018). La rigenerazione in ambito sportivo si riferisce sia all'aspetto fisiologico del recupero dopo l'affaticamento fisico dato dall'allenamento o dalla competizione (Kellmann & Beckmann, 2018), sia all'aspetto psicologico per il ripristino delle risorse cognitive ed emotive compromesse dallo stress sperimentato (Beckmann & Elbe, 2015). Il recupero è una fase fondamentale per il mantenimento della performance nel tempo e per la diminuzione del rischio di infortuni da sovraccarico (Meeusen et al., 2012), in quanto il recupero insufficiente compromette i processi di riparazione tissutale e altera il controllo neuromuscolare (Kellmann et al., 2018).

Il recupero in ambito sportivo non si limita al solo ripristino delle riserve energetiche, ma coinvolge anche il riequilibrio del sistema nervoso autonomo (Stanley et al., 2013): il biofeedback è di conseguenza uno strumento che può essere di fondamentale importanza nel recupero, in quanto consente all'atleta di monitorare e regolare in tempo reale i propri parametri psicofisiologici (Levy & Baldwin, 2019). Ad esempio, Perez-Gaido e collaboratori (2021) hanno condotto uno studio con l'obiettivo di valutare gli effetti del biofeedback HRV sul recupero dopo uno sforzo fisico; il protocollo in questione era attuato tramite la respirazione alla frequenza di risonanza. La respirazione alla frequenza di risonanza è una tecnica che stimola il sistema cardiovascolare attraverso una frequenza respiratoria lenta e regolare, la quale aumenta la variabilità cardiaca e produce quindi ampie oscillazioni sinusoidali della frequenza cardiaca e della pressione arteriosa; tali modificazioni favoriscono una maggiore attivazione parasimpatica (Lehrer & Gevirtz, 2014). I risultati dello studio di Perez-Gaido e collaboratori (2021) hanno dimostrato che l'uso del biofeedback HRV portava ad una riduzione significativa dei tempi di recupero. Tale miglioramento può essere spiegato da due principali benefici derivanti dalla respirazione alla frequenza di risonanza: il sistema cardiovascolare è aiutato ad adattarsi più rapidamente alle richieste

ambientali e interne, ossia da uno stato di stress ad uno di riposo, favorendo un ritorno più rapido all'omeostasi (Lehrer & Eddie, 2013). Inoltre, si ottimizza la ventilazione alveolare e l'equilibrio tra ossigeno e anidride carbonica (Yasuma & Hayano, 2004), migliorando quindi l'assorbimento di ossigeno e riducendo i livelli di anidride carbonica nel sangue (Laforgia et al., 2006). Un ulteriore risultato rilevante dello studio di Perez-Gaido e collaboratori (2021) è la percezione dei partecipanti di aver ottenuto un recupero più efficace dopo la sessione di biofeedback. In linea con questi risultati, evidenze precedenti sottolineano che una più rapida attivazione parasimpatica post-esercizio è associata ad un miglior recupero funzionale e ad una maggiore tolleranza ai carichi di allenamento (Chen et al., 2011; Stanley et al., 2013).

Oltre che nei contesti di allenamento, un recupero più veloce ed efficace è una risorsa vantaggiosa anche in gara, soprattutto negli sport a carico intermittente come il basket o il rugby, dove le brevi pause tra le azioni consentono di usare strategie di autoregolazione apprese tramite il biofeedback (Yilmaz et al., 2025). Tali strategie di autoregolazione mirano a ripristinare più rapidamente le risorse psicofisiologiche, permettendo agli atleti di affrontare con maggiore efficacia le fasi successive di gioco e conseguentemente di influenzare positivamente la performance (Perez-Gaido et al., 2021).

3.3 Biofeedback nel recupero da infortunio

Gli infortuni sportivi sono un evento frequente nella carriera degli atleti e hanno conseguenze significative sulla partecipazione sportiva e sulla performance futura. Ardern e colleghi (2014) hanno infatti analizzato gli esiti di ritorno allo sport di oltre 7000 atleti dopo un intervento chirurgico di ricostruzione del legamento crociato anteriore, osservando che circa l'80% era ritornato a praticare attività sportive. Tuttavia, i tassi di ritorno ai livelli prestazionali pre-infortunio risultavano inferiori: solo il 65% degli atleti era riuscito a recuperare le prestazioni precedenti all'infortunio, mentre appena il 55% era tornato a praticare lo sport a livello agonistico. Questi dati evidenziano come il recupero neuromuscolare non garantisca automaticamente un ritorno ai livelli prestazionali e competitivi pre-infortunio.

La riabilitazione post-infortunio non dovrebbe quindi limitarsi alla semplice guarigione

fisica, ma dovrebbe configurarsi come un approccio integrato che prenda in considerazione sia il ripristino delle abilità neuromuscolari sia il supporto psicologico all'atleta (Rollo et al., 2017). Infatti, sia il dolore percepito e le conseguenti strategie di compensazione muscolare (Hodges & Tucker, 2011) sia le risposte emotive e cognitive in seguito all'infortunio (Evans et al., 2012) possono influenzare significativamente la qualità del recupero e il ritorno efficace allo sport (Wiese-Bjornstal et al., 1998).

Dal punto di vista neuromuscolare è fondamentale ristabilire la corretta attivazione dei muscoli agonisti e antagonisti, garantendo una stabilità articolare adeguata (Dingenen & Gokeler, 2017), e ridurre sia l'inibizione muscolare artrogenica (Lepley & Lepley, 2021) sia l'ipertono compensatorio (Hodges & Tucker, 2011). L'uso del biofeedback permette all'atleta di modulare selettivamente l'attivazione muscolare, favorendo la più efficiente sincronizzazione neuromuscolare e riducendo le strategie maladattive in seguito a infortunio (Campanini et al., 2020; Ananías et al., 2024; Morales-Sánchez et al., 2022; Hernández-Mendo, 2011; Hernández-Mendo & Morales-Sánchez, 2014). Inoltre, il biofeedback può agire sulla prevenzione di infortuni futuri (Hernández-Mendo, 2009) migliorando i meccanismi involontari di attivazione muscolare, come i riflessi articolari (Inglis et al., 1976; Morales-Sánchez et al., 2022). Dal punto di vista psicologico, invece, il biofeedback si è dimostrato utile nella riduzione della catastrofizzazione del dolore e delle risposte psicologiche disadattive, aumentando le probabilità di un più efficace ritorno allo sport (Rollo et al., 2017).

Le potenziali applicazioni del biofeedback nel processo di recupero post-infortunio verranno di seguito illustrate più approfonditamente.

3.3.1 Gestione del tono muscolare nell'area lesionata

Nel recupero da infortunio uno degli obiettivi principali è il ripristino del corretto controllo neuromuscolare dell'area lesionata, al fine di garantire un'adeguata stabilità articolare e una corretta risincronizzazione dei muscoli agonisti e antagonisti nella zona interessata dall'infortunio (Dingenen & Gokeler, 2017). È fondamentale ridurre sia l'inibizione muscolare artrogenica, ossia il meccanismo neuro-riflesso per cui il sistema nervoso centrale riduce l'attivazione volontaria di un muscolo precedentemente lesionato (Lepley & Lepley, 2021), sia l'ipertono compensatorio, ossia un eccessivo aumento del tono muscolare in un distretto adiacente all'area lesionata (Hodges & Tucker, 2011). Nonostante l'ipertono compensatorio sia una strategia adattiva

immediata per preservare la funzione motoria, la sua persistenza nel tempo inibisce il processo di recupero dall'infortunio: tale sovra-attivazione, infatti, favorisce il consolidamento di strategie motorie maladattive (Hodges & Tucker, 2011), le quali interferiscono con la corretta riprogrammazione neuromuscolare e predispongono il soggetto a infortuni secondari dovuti ad una distribuzione non fisiologica dei carichi (Dingenen & Gokeler, 2017).

Il biofeedback EMG è uno strumento particolarmente efficace nella riabilitazione dell'area lesionata, in quanto consente all'individuo di visualizzare in tempo reale la propria attività muscolare e conseguentemente di modulare in modo selettivo l'attivazione nei muscoli target (Campanini et al., 2020). Alcuni studi suggeriscono che tali protocolli possano facilitare il recupero rispetto ai programmi riabilitativi tradizionali. In particolare, in seguito a interventi chirurgici al ginocchio come la ricostruzione del legamento crociato anteriore o la meniscectomia, l'impiego del biofeedback ha determinato un incremento significativo dell'attivazione del quadricipite, favorendo contestualmente l'estensione del ginocchio, la stabilità articolare e il controllo dell'equilibrio (Ananías et al., 2024; Morales-Sánchez et al., 2022). Tali risultati suggeriscono che il biofeedback EMG può essere utile per la riduzione degli effetti dell'inibizione muscolare artrogenica, indotti dalla lesione in sé o dall'intervento chirurgico subito (Richaud et al., 2024), e in generale per il recupero di vari tipi di lesioni muscolari, ossee e legamentose (Hernández-Mendo, 2011; Hernández-Mendo & Morales-Sánchez, 2014), riducendo anche le strategie di ipertono compensatorio (Campanini et al., 2020). Inoltre, l'impiego del biofeedback non migliora solo l'attivazione muscolare volontaria ma agisce anche sui meccanismi involontari, come i riflessi articolari (Inglis et al., 1976; Morales-Sánchez et al., 2022), con evidenti implicazioni nella prevenzione di futuri infortuni (Hernández-Mendo, 2009).

3.3.2 Controllo della percezione del dolore durante la riabilitazione

Il dolore percepito dall'atleta è uno degli ostacoli principali nel processo di recupero post-infortunio, poiché limita la partecipazione attiva del paziente agli esercizi riabilitativi e interferisce con la corretta attivazione muscolare (Hodges & Tucker, 2011). L'impiego del biofeedback risulta utile non solo per il ripristino del controllo neuromuscolare in sé, ma anche per modulare la percezione del dolore durante la riabilitazione: Giggins e colleghi (2013) evidenziano che ciò è possibile perché il

biofeedback può facilitare la correzione di pattern di movimento biomeccanicamente inefficienti, come l'eccessiva contrazione muscolare, che potrebbero contribuire alla percezione di dolore e rigidità nell'area lesionata. In particolare, in seguito a infortunio l'attivazione dei muscoli doloranti tende a diminuire e quindi viene aumentata l'attivazione degli antagonisti, con conseguente cambiamento nella meccanica articolare: tale adattamento ha la funzione di proteggere l'area lesionata, ma se persiste nel tempo aumenta il rischio di recidive o di infortuni secondari (Dingenen & Gokeler, 2017). Inoltre, tale strategia di adattamento, spesso descritta come *splinting* (Marras et al., 2004), porta ad un aumento della rigidità articolare nell'area interessata e ad una potenziale riduzione della microcircolazione locale, alimentando ulteriormente la sintomatologia dolorosa nell'individuo (Hodges & Tucker, 2011).

Oltre al biofeedback EMG, i protocolli che integrano le tecniche di respirazione controllata possono essere utili nella riabilitazione post-infortunio: diversi studi evidenziano che la respirazione guidata e l'allenamento dei muscoli inspiratori possono ridurre la percezione del dolore, facilitando l'inizio e il mantenimento della riabilitazione (Ahmadnezhad et al., 2020; Sunadi et al., 2020). Nello specifico, la respirazione lenta e profonda agisce modulando l'azione del sistema nervoso autonomo: aumentando l'attività parasimpatica a discapito di quella simpatica, la modifica della frequenza respiratoria favorisce una riduzione dell'arousal (Busch et al., 2012). Tale modifica a livello fisiologico sembra influenzare direttamente le vie discendenti di controllo del dolore, sebbene i precisi meccanismi neurobiologici sottostanti siano tuttora oggetto di approfondimento in letteratura (Jafari et al., 2017). Infine, ulteriori studi suggeriscono che la respirazione controllata può ridurre i vissuti di ansia associati al dolore e migliorare l'elaborazione emotiva della sensazione dolorosa: si favorisce così non solo il recupero fisico, ma si pongono anche le basi per superare le barriere psicologiche del percorso di ritorno allo sport in seguito a infortunio (Busch et al., 2012; Rollo et al., 2017).

3.3.3 Supporto al recupero psicologico

Sebbene la riabilitazione si concentri maggiormente sugli aspetti fisici dell'infortunio, i ricercatori hanno dimostrato che il recupero da infortunio implica molto più della semplice guarigione fisica (Rollo et al., 2017): gli atleti subiscono stressor psicologici, sociali e finanziari oltre che fisici. Essi, infatti, a livello

cognitivo devono capire la natura dell'infortunio subito, a livello emotivo devono far fronte alle conseguenze negative che ne derivano e a livello comportamentale devono gestire attivamente la loro condizione (Evans et al., 2012).

Wiese-Bjornstal e colleghi (1998) suggeriscono che i fattori personali e situazionali pre-infortunio e post-infortunio influenzano la risposta emotiva e comportamentale all'infortunio, mediata da un processo di valutazione cognitiva. Emozioni come shock, ansia, rabbia, depressione e impotenza possono essere elementi prevalenti all'inizio dell'infortunio, seguiti da frustrazione, senso di colpa e apatia durante il processo di riabilitazione (Evans et al., 2012). Successivamente, nel ritorno allo sport, gli atleti possono sperimentare impazienza, ansia da re-infortunio e livelli fluttuanti di fiducia (Evans & Hardy, 2002; Tracey, 2003). Poiché la fase iniziale della riabilitazione post-infortunio è frequentemente associata ai maggiori livelli di alterazione dell'umore (Johnston & Carroll, 1998), è essenziale integrare l'intervento fisioterapico con un supporto psicologico strutturato. Tale integrazione permette non solo una maggiore aderenza al programma riabilitativo (Brewer et al., 2000), ma anche un sostegno all'atleta nell'elaborazione emotiva dell'infortunio e nel percorso di ritorno allo sport (Arden et al., 2013b).

In letteratura vi sono diversi studi su varie tecniche psicologiche utilizzate per sostenere l'individuo nel processo di riabilitazione, come il rilassamento (Cupal & Brewer, 2001), il goal setting (Evans & Hardy, 2002), l'imagery (Wesch et al., 2012) e il modeling (Maddison et al., 2006); tali tecniche si sono dimostrate utili nel miglioramento delle risposte psicologiche e nella gestione del dolore tra gli atleti infortunati. L'uso del biofeedback in questo ambito, invece, è ancora limitatamente indagato in letteratura, anche se l'utilizzo di tale strumento sta guadagnando popolarità negli ultimi anni (Rollo et al., 2017).

Rollo e collaboratori (2017) hanno condotto uno studio pilota per indagare gli effetti del biofeedback HRV impiegato su atleti infortunati. Tale studio ha fornito evidenze preliminari secondo cui il training di biofeedback è associato a miglioramenti nei livelli di catastrofizzazione del dolore. La catastrofizzazione del dolore è caratterizzata da ruminazione, ossia la difficoltà dell'individuo di pensare ad altro che non sia l'infortunio, magnificazione, cioè la tendenza ad esasperare la gravità della situazione e le possibili conseguenze, e impotenza, ovvero la sensazione di non

avere alcun strumento per far fronte al dolore e al recupero (Sullivan et al., 1995). Tali elementi fanno parte dei principali predittori psicologici di un processo riabilitativo insoddisfacente, in quanto vi è una focalizzazione eccessiva sui sintomi algici e un senso di impotenza che alimenta il ciclo della kinesiofobia (Vlaeyen & Linton, 2000), ossia la condizione in cui si sperimenta una paura eccessiva, irrazionale e debilitante di eseguire movimenti fisici, a causa di una percezione di vulnerabilità a un infortunio doloroso o alla sua recidiva (Kori et al., 1990). Lo studio di Rollo e colleghi (2017) ha inoltre dimostrato un miglioramento nelle risposte psicologiche degli atleti infortunati, come ad esempio la devastazione emozionale (Evans et al., 2008) relativa alla sperimentazione di un profondo senso di disperazione e di perdita della propria identità atletica (Brewer & Chatterton, 2024). Inoltre, gli autori hanno rilevato un'associazione tra l'impiego del biofeedback e la modifica di alcuni indici fisiologici rilevanti in condizione di riposo, come la riduzione della frequenza respiratoria e l'aumento della componente a bassa frequenza (LF) della HRV. Tale componente è talvolta interpretata come un indicatore della maggiore capacità di autoregolazione fisiologica e di adattamento allo stress (Shaffer & Ginsberg, 2017).

Considerando le evidenze disponibili in letteratura che collegano la catastrofizzazione del dolore ad esiti riabilitativi sfavorevoli e ad un ridotto miglioramento clinico (Bergbom et al., 2011), nonché l'associazione tra risposte psicologiche disadattive e il mancato ritorno ai livelli prestazionali precedenti all'infortunio (Arderin et al., 2015), il biofeedback può essere ipotizzato come strategia efficace per favorire il processo riabilitativo e aumentare le probabilità di un ritorno allo sport efficace (Arderin et al., 2013b; Rollo et al., 2017). In conclusione, l'integrazione del biofeedback all'interno dei convenzionali percorsi di riabilitazione non si limita ad un supporto puramente neuromuscolare, ma agisce come un potente strumento di mediazione cognitiva ed emozionale (Evans et al., 2012). Infatti, permettendo all'atleta il controllo dei propri parametri fisiologici si può avere una neutralizzazione delle risposte psicologiche disadattive, come la catastrofizzazione del dolore e la kinesiofobia, e una mitigazione del vissuto emotivo legato alla perdita temporanea dell'identità sportiva (Rollo et al., 2017), elementi che diventano spesso ostacoli nel percorso riabilitativo.

CAPITOLO 4

IL NEUROFEEDBACK NELLO SPORT

4.1 Fondamenti neuroscientifici del neurofeedback

Il neurofeedback è una forma di biofeedback che fornisce supporto per l'autoregolazione dell'attività cerebrale, consentendo all'individuo di visualizzare in tempo reale i propri pattern di attivazione neurale e di apprendere a modularli attraverso i feedback ricevuti, positivi per l'attività cerebrale funzionale e negativi per quella disfunzionale (Marzbani et al., 2016).

In seguito alle prime registrazioni elettroencefalografiche (EEG) non invasive condotte da Berger (1929), studi pionieristici hanno successivamente dimostrato che l'attività cerebrale non è un fenomeno statico ma è soggetta a continue variazioni legate all'esperienza e al contesto (Adrian & Matthews, 1934; Darrow, 1947).

Queste evidenze hanno aperto la strada alla possibilità di modulare volontariamente la propria attività cerebrale: nello specifico, tale possibilità è stata messa in luce da alcuni studi a partire dalla fine degli anni Sessanta (Kamiya, 2011). Parte di questi studi ebbe inizio con protocolli di training finalizzati all'aumento delle onde alfa, con l'obiettivo quindi di favorire uno stato di rilassamento psicofisiologico; altri studi, invece, si concentrarono parallelamente sul trattamento dell'epilessia farmacoresistente, prima conducendo ricerche su soggetti animali e poi su umani (Hammond, 2011). Successivi sviluppi hanno evidenziato che l'esposizione ripetuta a specifici pattern di attivazione cerebrale può rinforzare i circuiti neurali coinvolti, facilitando il richiamo e il mantenimento nel tempo dei pattern desiderati (Kamiya, 1968). Tale processo, supportato dai principi del condizionamento operante (Skinner, 1953) e dai modelli di neuroplasticità (Hebb, 1949), porterebbe l'individuo ad adattamenti funzionali stabili nell'ambiente (Serman, 1996).

L'interesse scientifico verso il neurofeedback è cresciuto in modo significativo nei successivi decenni, portando ad un progressivo ampliamento delle sue applicazioni in ambito clinico. Ad oggi tale strumento è impiegato nel trattamento di diverse condizioni psicopatologiche, tra cui il disturbo da deficit di attenzione e iperattività (ADHD), i

disturbi d'ansia, l'epilessia, i disturbi depressivi, l'insonnia, le dipendenze da sostanze, i disturbi specifici dell'apprendimento (DSA), la schizofrenia e i disturbi dello spettro autistico (Marzbani et al., 2016). Oltre alle applicazioni in ambito clinico, il neurofeedback ha suscitato anche interesse nell'ambito del potenziamento cognitivo e della performance: diversi contributi in letteratura hanno sottolineato gli effetti significativi di tale strumento sulle funzioni esecutive, rendendo il neurofeedback applicabile anche per l'ottimizzazione della prestazione sportiva (Gruzelier, 2014).

Il neurofeedback viene impiegato per il potenziamento delle prestazioni anche al di fuori del contesto sportivo, ad esempio in ambito artistico: tale strumento può infatti migliorare la performance musicale (Egner & Gruzelier, 2003; Gruzelier, 2018), la prestazione vocale nel canto (Gruzelier et al., 2013; Kleber et al., 2008) e le abilità di recitazione (Gruzelier et al., 2010; Gruzelier, 2018). Oltre al contesto artistico, il neurofeedback può essere impiegato per migliorare le abilità in ambiti professionali altamente specializzati: ad esempio, uno studio condotto da Ros e collaboratori (2009) su chirurghi oftalmici ha evidenziato un miglioramento significativo delle abilità chirurgiche dopo un training di neurofeedback, con riduzione dell'ansia e una diminuzione del 26% del tempo necessario per completare i compiti chirurgici. In linea con quanto riportato da Hammond (2011), tali evidenze presenti in letteratura indicano che le applicazioni del neurofeedback sono promettenti in diversi ambiti.

La letteratura scientifica evidenzia inoltre che l'efficacia del neurofeedback è connessa alla personalizzazione del training, suggerendo che tale strumento non può essere considerato un approccio standardizzato ma necessita di un adattamento alle caratteristiche individuali del soggetto, fra cui il profilo elettroencefalografico di base (Vernon, 2005). Con tale termine si intende l'insieme delle caratteristiche dell'attività elettrica cerebrale spontanea in condizioni di riposo (Musso et al., 2010). La registrazione preliminare dell'attività elettroencefalografica è un passo fondamentale per l'impostazione dei protocolli di neurofeedback: con tale registrazione si consente infatti di identificare eventuali deviazioni dai pattern cerebrali attesi (Arns et al., 2009). Infatti, l'approccio basato sull'analisi quantitativa dell'EEG (qEEG) consente un confronto del profilo individuale registrato con i database normativi costruiti su campioni stratificati per età, genere, caratteristiche demografiche e altri attributi (Prichep & John, 1992; Thatcher & Lubar, 2009). Tale confronto, effettuato attraverso

indici di deviazione come i z-score, permette di individuare i pattern di ipoattivazione o iperattivazione e le alterazioni della coerenza funzionale tra aree corticali diverse, ossia anomalie nella sincronizzazione dell'attività elettrica tra regioni cerebrali collegate (Thatcher et al., 2005). Il qEEG orienta quindi la definizione personalizzata dei protocolli di neurofeedback da attivare sul soggetto, adattandoli al singolo profilo neurofisiologico rilevato (Vernon, 2005).

4.1.1 Plasticità cerebrale e meccanismi di funzionamento

Il presupposto neuroscientifico centrale del neurofeedback è la plasticità cerebrale, definita come la capacità del sistema nervoso di modificare l'organizzazione strutturale, come cambiamenti nella mielinizzazione della sostanza bianca o nel volume della materia grigia, e l'organizzazione funzionale, creando nuove connessioni sinaptiche e rafforzando o indebolendo quelle già esistenti (Loriette et al., 2021). Tali modifiche avvengono in risposta all'esperienza e all'apprendimento, permettendo al cervello di adattarsi ad un ambiente in continua evoluzione per tutta la vita (Kolb et al., 2003). Infatti, sebbene la plasticità sia maggiore nelle fasi precoci dello sviluppo e quindi fino all'adolescenza, essa viene mantenuta anche in età adulta: tali modifiche a livello neurale vengono stimulate sia da attività cognitivamente impegnative, come ad esempio lettura, musica, arte e studio, sia da specifici training mirati alla regolazione neurofisiologica, come appunto il neurofeedback (Loriette et al., 2021).

Dal punto di vista operativo il neurofeedback si basa sulla registrazione dell'attività cerebrale del soggetto e sulla restituzione in tempo reale di tali dati (Marzbani et al., 2016). Il presupposto teorico di questo strumento è duplice: da un lato, un'azione diretta sull'attività di una specifica area cerebrale può produrre degli effetti osservabili sul comportamento e, dall'altro, la cognizione può essere migliorata dal soggetto stesso, attraverso la possibilità di conoscere in tempo reale i dettagli sulla propria attività cerebrale (Loriette et al., 2021). Il feedback può essere restituito al soggetto in diverse modalità sensoriali. Nella maggior parte dei casi l'attività cerebrale viene trasformata in segnali visivi o uditivi, come la modifica delle dimensioni di un oggetto visualizzato sullo schermo o la variazione nell'intensità di un suono (Thibault et al., 2016). Tuttavia, approcci più recenti hanno ampliato le possibilità di restituzione del segnale cerebrale, inserendo il neurofeedback in un contesto maggiormente immersivo e motivante per l'individuo. Ad esempio, analogamente al biofeedback, vengono realizzati *serious*

games per permettere al soggetto di interagire con un ambiente virtuale controllandolo con i propri segnali cerebrali, come sfide interattive in cui il movimento di un personaggio o lo spostamento di una palla dipendono dall'attività EEG (Kober et al., 2025). Un'altra possibilità di neurofeedback non tradizionale è realizzata attraverso la fruizione di contenuti multimediali, in cui l'esperienza visiva e uditiva viene modulata in tempo reale in base ai segnali cerebrali del soggetto (Tokunaga & Lyons, 2020).

I meccanismi di funzionamento del neurofeedback sono quindi riconducibili alla plasticità cerebrale: la ricezione del feedback, sia esso un segnale visivo o uditivo, un contenuto multimediale o un ambiente virtuale, guida la modulazione dell'attività neurale (Hammond, 2011). L'apprendimento neurofisiologico indotto dal neurofeedback si basa infatti su processi di plasticità sinaptica, principalmente mediati dalla *long-term potentiation* (LTP). Tale processo può essere riassunto nella citazione di Hebb (1949) "*neurons that fire together wire together*": se l'attività di un neurone presinaptico produce ripetutamente l'attivazione di un neurone postsinaptico, la connessione tra i due si rafforza in maniera duratura e la struttura sinaptica subisce quindi una modificazione. Tale modificazione consente un potenziamento sinaptico: nello specifico, essa aumenta l'efficacia di trasmissione dell'impulso nelle successive attivazioni del neurone presinaptico, incrementando la probabilità di eccitare il neurone postsinaptico coinvolto nel potenziamento (Lynch, 2004). La letteratura esistente sostiene che la LTP è un meccanismo centrale alla base dell'apprendimento associativo (Cooke & Bear, 2012). Tale meccanismo è sfruttato nel neurofeedback attraverso il feedback dell'attività cerebrale in tempo reale: quando l'individuo genera un pattern di attività cerebrale desiderato, i circuiti neuronali e i collegamenti sinaptici vengono rafforzati, favorendo quindi l'apprendimento e il consolidamento di configurazioni funzionali di attività cerebrale (Hammond, 2011). Il neurofeedback promuove infatti la modulazione volontaria dell'attività cerebrale, guidata dai meccanismi di LTP e dai principi del condizionamento operante (Sitaram et al., 2017).

Studi più recenti si sono concentrati su una forma precisa di LTP chiamata plasticità sinaptica dipendente dalla distribuzione temporale degli impulsi (*spike timing-dependent plasticity*, STDP; Caporale & Dan, 2008), secondo cui la forza sinaptica aumenta quando due neuroni si attivano in rapida successione, entro una finestra temporale di decine di millisecondi (Dan & Poo, 2006). Tale meccanismo può

estendersi su scala più ampia e riguardare intere aree cerebrali quando molteplici connessioni sinaptiche sono interessate da STDP in modo simultaneo, favorendo la coerenza funzionale tra le aree corticali: il neurofeedback, ad esempio, può infatti aumentare la sincronizzazione tra aree cerebrali spazialmente distanti, formando reti neurali funzionali per sostenere cognizioni, emozioni e comportamenti complessi (Sitaram et al., 2017).

Oltre alla riorganizzazione dei circuiti neurali, il neurofeedback ha effetti anche nel modulare l'ambiente neurochimico, influenzando in particolare i sistemi dopaminergici. Poiché il neurofeedback si basa sui principi del condizionamento operante, il feedback ricevuto agisce come rinforzo che attiva le vie mesolimbiche della ricompensa. Infatti, il rilascio di dopamina nel nucleo accumbens e nella corteccia prefrontale durante il training sostiene la motivazione nell'individuo e agisce come segnale per potenziare le sinapsi attive, facilitando la transizione dalla plasticità a breve termine a quella a lungo termine (Schultz, 2015; Sitaram et al., 2017).

In ambito sportivo la duplice azione strutturale e neurochimica del neurofeedback trova applicazione in due contesti: l'ottimizzazione della performance e il recupero da infortunio. Ad esempio, il favorimento della coerenza funzionale tra le aree corticali ottenuto dal neurofeedback permette all'atleta di raggiungere il cosiddetto *peak performance state*, ossia uno stato psicofisiologico caratterizzato da elevata concentrazione, efficiente regolazione dell'arousal, rapidità decisionale e integrazione ottimale tra processi cognitivi ed esecutivi (Graczyk et al., 2014; Hammond, 2007). Riguardo al recupero da infortunio, invece, la plasticità neurale indotta dal neurofeedback può facilitare il rimodellamento delle mappe motorie corticali alterate a seguito del trauma fisico subito o di lunghi periodi di inattività (Grooms et al., 2017). Inoltre, le evidenze disponibili in letteratura suggeriscono che il neurofeedback potrebbe contribuire a modulare la percezione del dolore (Peng et al., 2020; Roy et al., 2020), supportando quindi negli atleti un processo di riabilitazione più rapido ed efficiente, e a ridurre la paura del re-infortunio, grazie alla diminuzione dell'ansia e al miglioramento del controllo emotivo (Tosti et al., 2024a).

4.1.3 Tipi di neurofeedback e strumenti utilizzati

Il neurofeedback maggiormente utilizzato è il neurofeedback EEG frequenza/potenza, focalizzato sulla regolazione di velocità e ampiezza di determinate onde cerebrali in

particolari siti corticali (Marzbani et al., 2016). Tuttavia, esistono altri sistemi di neurofeedback basati sull'EEG, come lo *Slow Cortical Potential* (SCP) e la *Low-Resolution Electromagnetic Tomography* (LORE-TA). A differenza del neurofeedback tradizionale che interviene sulla frequenza delle onde cerebrali, il neurofeedback SCP si focalizza sulla regolazione dei potenziali corticali lenti, a cui si associano i livelli di eccitabilità della rete neuronale (Birbaumer et al., 1990). Tale tipologia di neurofeedback è soprattutto impiegata nel trattamento di ADHD, epilessia ed emicranie (Christiansen et al., 2014). Il LORE-TA, invece, è una tecnica che si focalizza sull'origine tridimensionale dei segnali elettrici registrati dagli elettrodi, stimando quindi la densità di corrente elettrica nelle aree cerebrali profonde (Pascual-Marqui et al., 1994). Il neurofeedback LORE-TA permette di identificare e modulare l'attività di circuiti neurali profondi, non raggiungibili dai sistemi tradizionali EEG (Thatcher, 2012).

Oltre ai sistemi di neurofeedback basati sull'elettroencefalografia, vi sono tipologie basate su tecniche emodinamiche, come l'emoencefalografia (HEG) o la risonanza magnetica funzionale (fMRI). Il neurofeedback HEG monitora i cambiamenti nel flusso sanguigno principalmente nella corteccia prefrontale, al fine di incrementare l'ossigenazione e di conseguenza potenziare i tessuti neurali nel sostenere compiti cognitivi complessi (Toomim et al., 2005). Il neurofeedback fMRI, invece, consente all'individuo di modulare volontariamente l'attivazione di specifiche aree cerebrali con una precisione spaziale non raggiungibile con le tecniche elettroencefalografiche (Sitaram et al., 2017). Tuttavia, il neurofeedback fMRI presenta limiti significativi a causa dei costi elevati, della scarsa portabilità e della risoluzione temporale ridotta (Thibault et al., 2018).

Alla luce della presentazione dei vari strumenti di neurofeedback esistenti, appare evidente che la scelta su quale tecnica usare dipende dal bilanciamento tra precisione spaziale, risoluzione temporale e sostenibilità clinica (Sitaram et al., 2017). Nonostante l'elevato potenziale dei neurofeedback basati sull'emodinamica e l'integrazione in alcuni studi di segnali EEG e fMRI, combinando quindi l'alta risoluzione temporale dell'EEG con l'alta risoluzione spaziale della fMRI (Sitaram et al., 2017), la presente trattazione si focalizzerà sull'approfondimento del neurofeedback EEG. Tale scelta è motivata non solo dalla sua preminenza in letteratura (Marzbani et al., 2016), ma anche

dal fatto che il neurofeedback EEG è particolarmente apprezzato in ambito sportivo grazie alla sua risoluzione temporale superiore alla fMRI, necessaria all'apprendimento per condizionamento operante (Skinner, 1953), e alla sua portabilità e capacità di adattamento a diversi scenari di registrazione in contesti sportivi (Yu et al., 2025). Inoltre, in linea con precedenti meta-analisi (Xiang et al., 2018; Onagawa et al., 2023), Yu e colleghi (2025) hanno rilevato che il neurofeedback EEG può avere un impatto positivo moderato su varie abilità motorie e risultati sportivi.

Oltre all'ottimizzazione della performance, il neurofeedback EEG può essere una tecnica utile nella prevenzione (Ford et al., 2015; Rusciano et al., 2017) e nel recupero di infortuni sportivi (Alahakone et al., 2010; Conder & Conder, 2015), ma anche nel monitoraggio dello stato di salute dell'atleta durante la riabilitazione, permettendo un ritorno più rapido e completo allo sport (Malik et al., 2016). Il neurofeedback EEG, inoltre, può essere impiegato durante la riabilitazione per migliorare l'autoregolazione emotiva (Perry et al., 2011), per intervenire su individui con lesioni resistenti al trattamento (Conder & Conder, 2015) e per contrastare la percezione del dolore e la kinesiophobia (Yalfani & Ahmadi, 2024).

Il neurofeedback EEG (di seguito denominato semplicemente neurofeedback) si basa sul fondamento che l'attività dei neuroni fornisce informazioni rilevanti sul funzionamento del sistema nervoso: quando un neurone si attiva, infatti, genera un impulso elettrico e tale impulso elettrico può essere registrato dall'EEG tramite elettrodi posizionati sullo scalpo (Nunez & Srinivasan, 2006). Il segnale EEG deriva principalmente dall'attività sincrona di specifiche popolazioni neuronali, in particolare i neuroni piramidali, la cui attività elettrica si riflette nelle aree cutanee sottostanti agli elettrodi (Marzbani et al., 2016).

Nel neurofeedback il largo impiego dell'EEG è giustificato dalla sua elevata risoluzione temporale e dalla sua capacità di fornire una visione d'insieme della dinamica cerebrale in tempo reale: il segnale elettrico viene acquisito tramite un numero ridotto di elettrodi, solitamente pari a 19 (Hammond, 2007), in cui ogni sensore registra l'attività elettrica di una popolazione di neuroni stimata tra i 100 milioni e 1 miliardo di unità, fornendo una *big picture* delle funzioni cerebrali (Nunez & Srinivasan, 2006). Hammond (2007, 2011a, 2011b) argomenta che un numero ridotto di elettrodi garantisce una copertura sufficiente delle principali aree corticali, assicurando al contempo la stabilità del

segnale e la comparabilità delle registrazioni con i database normativi esistenti. Sebbene l'evoluzione tecnologica abbia introdotto l'EEG ad alta densità (HD-EEG) con una quantità di elettrodi più importante, arrivando fino a 256 sensori da posizionare sullo scalpo (Morabito et al., 2023), lo standard metodologico per il posizionamento dei sensori resta il Sistema Internazionale 10-20 (Klem et al., 1999). La denominazione deriva dal calcolo delle distanze percentuali, appunto 10% o 20%, tra i punti di riferimento cranici fissi, quali il nasion (ponte del naso) e l'inion (protuberanza occipitale) (Jasper, 1958).

Inoltre, la nomenclatura di tale sistema identifica ogni sito su cui posizionare l'elettrodo tramite una lettera indicante il lobo cerebrale sottostante e un numero che ne precisa la lateralità. Nello specifico le cifre dispari fanno riferimento all'emisfero sinistro e quelle pari all'emisfero destro, mentre lo zero indica gli elettrodi posti sulla linea mediana e fondamentali per il monitoraggio dei ritmi di integrazione interemisferica (Jasper, 1958). La standardizzazione del Sistema Internazionale 10-20 garantisce quindi un posizionamento sistematico degli elettrodi, permettendo allo stesso tempo di registrare agevolmente l'attività elettrica cerebrale in maniera affidabile e riproducibile, facilitando il confronto tra diverse registrazioni sullo stesso soggetto, diversi soggetti e con database normativi, nonché l'implementazione di protocolli di neurofeedback personalizzati (Jasper, 1958; Niedermeyer & da Silva, 2005; Marzbani et al., 2016).

4.1.1 Tipologie di onde cerebrali e relativi protocolli

I diversi pattern di attività elettrica, registrati dagli elettrodi e comunemente definiti onde cerebrali, si distinguono per ampiezza e frequenza. La frequenza, misurata in Hertz (Hz), è definita dal numero di onde al secondo e indica quindi la velocità di oscillazione delle onde cerebrali. L'ampiezza, misurata in microvolt (μV), indica invece la potenza di tali onde (Marzbani et al., 2016). L'attività cerebrale registrata attraverso l'EEG viene suddivisa in bande di frequenza distinte, ossia delta, theta, alfa, beta e gamma, ciascuna associata a specifiche funzioni fisiologiche (Marzbani et al., 2016). Tale classificazione è il riferimento più diffuso in ambito clinico e di ricerca, anche se i limiti di frequenza di ogni banda possono variare leggermente tra i diversi studi (Niedermeyer & Da Silva, 2005; Buzsáki, 2006).

Le onde delta (<4 Hz), le onde cerebrali più lente, sono la componente principale del tracciato EEG nella fase 3 del sonno e vengono quindi associate a processi di recupero

fisiologico e riparazione neuronale (Marzbani et al., 2016). La loro presenza marcata e diffusa in un individuo in stato di veglia è associata ad una ridotta attivazione corticale; se persistente, essa potrebbe essere un segnale per l'identificazione di lesioni cerebrali o di sofferenza tissutale derivanti da disfunzioni metaboliche o encefalopatie (Niedermeyer & Da Silva, 2005; Sanei & Chambers, 2007). Le onde delta non sono però solo un segnale di ridotta vigilanza: in letteratura viene ipotizzato che esse agiscono anche come meccanismo di inibizione delle interferenze sensoriali nei processi di problem solving complesso, permettendo al cervello di isolare le proprie operazioni cognitive dal “rumore” ambientale (Harmony, 2013). Inoltre, le onde delta sembrano essere coinvolte nell'integrazione tra attività cerebrale e sistema autonomo (Knyazev, 2012), oltre che nei circuiti motivazionali, sia relativamente ai meccanismi di ricompensa sia a risposte difensive primitive. Nello specifico, Knyazev (2012) sottolinea che le onde delta sono le oscillazioni cerebrali dominanti nei vertebrati inferiori e sono tuttora integrate nei complessi sistemi di elaborazione umana come substrati dei processi biologici primari. L'incremento dell'attività delta si può infatti osservare in corrispondenza di forti impulsi motivazionali, innescati sia dalla ricerca di una ricompensa biologica sia dalla percezione di un pericolo immediato, facilitando la percezione della salienza degli stimoli ambientali utili alla sopravvivenza. Nell'individuo in stato di veglia il sistema primordiale ad onde delta è solitamente oscurato dall'attività di sistemi cognitivi più avanzati, associati ad onde cerebrali a frequenze più elevate. Tuttavia, tale sistema riemerge quando le funzioni corticali superiori perdono la loro priorità ed efficienza, come appunto nel sonno profondo e in stati patologici o nei primi stadi dello sviluppo di un individuo.

Le onde theta (4-8 Hz) vengono rilevate tipicamente in condizioni di sonnolenza dell'individuo, ma anche negli stati di meditazione profonda (Marzbani et al., 2016) e nei processi di creatività e intuizione (Gruzelier, 2014). Tuttavia, la letteratura evidenzia anche una correlazione tra un eccesso di onde theta e diverse forme di disregolazione neuropsicologica: ad esempio, nell'ADHD un'elevata presenza di onde theta in stati di veglia è un biomarcatore affidabile della distraibilità e inattenzione (Bresnahan & Barry, 2002), associandosi ad uno stato di under-arousal che interferisce con l'elaborazione efficiente degli stimoli provenienti dall'ambiente (Loo & Makeig, 2012). Anomalie nella potenza theta sono state riscontrate anche in quadri clinici di ansia e depressione

(Marzbani et al., 2016), dove la presenza eccessiva di tali onde a livello della corteccia cingolata anteriore rostrale può associarsi ad un'eccessiva ruminazione interna o ad una disconnessione dai processi top-down (Cavanagh & Frank, 2014).

Le onde alfa (8-13 Hz) sono associate a stati di vigilanza rilassata e tranquillità mentale (Marzbani et al., 2016), costituendo il ritmo elettroencefalografico predominante in un individuo in stato di veglia (Niedermeyer & Da Silva, 2005). L'incremento delle onde alfa è correlato al raggiungimento di stati di rilassamento cerebrale, favorendo stabilità mentale e riduzione dell'arousal autonomico (Lagopoulos et al., 2009). Le frequenze alfa sono infatti fondamentali nei processi di rilassamento muscolare finalizzati all'addormentamento (Marzbani et al., 2016).

Marzbani e colleghi (2016) sottolineano che alcuni studi sostengono che il ritmo alfa sia suddiviso in due gruppi, ossia alfa inferiore (8-10 Hz) e superiore (10-13 Hz), mentre altri studi indicano addirittura l'esistenza di tre sottoinsiemi. Tali distinzioni suggeriscono che le onde alfa con frequenza alta siano collegate a comportamenti e prestazioni diverse rispetto a quelle con frequenza bassa: ad esempio, si ritiene che le onde alfa inferiori siano associate alla rievocazione di schemi d'azione nella memoria semantica, a differenza delle onde alfa superiori che non sembrano coinvolte in questi processi (Dempster, 2012).

Le onde SMR (13-15 Hz), ossia del ritmo sensorimotorio, si collocano tra i ritmi alfa e beta e sono caratterizzate da uno stato di allerta mentale unito ad un rilassamento fisico (Marzbani et al., 2016). Mentre il ritmo SMR corrisponde ad un'allerta cognitiva mediata dall'inibizione motoria, le onde beta (15-20 Hz) si associano ad uno stato di attivazione corticale e di impegno mentale verso gli stimoli dell'ambiente esterno: emergono infatti durante i processi di pensiero analitico, di focalizzazione cognitiva e di attenzione sostenuta (Marzbani et al., 2016). Le onde *high* beta (20-32 Hz), invece, sono associate a stati di intensità cognitiva elevata, come l'iperallerta (Marzbani et al., 2016): sebbene brevi scariche di tali onde possano essere rilevate durante compiti mentali complessi con una rapida risoluzione di problemi, una loro presenza eccessiva e duratura è documentata come un marcatore elettrofisiologico di stati ansiosi (Kropotov, 2009).

Le onde gamma (oltre 32 Hz) sono lo stato di massima attività cerebrale e sono associate all'apprendimento, all'acutezza mentale, all'elaborazione cognitiva e alla

risoluzione di problemi complessi (Marzbani et al., 2016). Esse sono inoltre associate alla memoria (Staufenbiel et al., 2014).

La mappatura dei vari ritmi cerebrali e delle funzioni associate è il fondamento dei protocolli di neurofeedback: attraverso il condizionamento operante (Skinner, 1953) si mira ad “allenare” il cervello, premiando la produzione di specifici ritmi desiderati e inibendo quelli disfunzionali (Marzbani et al., 2016). Tra i protocolli neurofeedback maggiormente documentati in letteratura troviamo il training volto ad aumentare le onde alfa. Di tale protocollo si evidenzia la versatilità in base ai siti corticali di applicazione e alle specifiche frequenze sollecitate: l’incremento delle onde alfa non favorisce soltanto il rilassamento, ma agisce anche su aspetti cognitivi ed emotivi complessi (Marzbani et al., 2016). Ad esempio, già lo studio pionieristico di Hardt e Kamiya (1978) aveva dimostrato il coinvolgimento delle onde alfa nei processi di regolazione emotiva: l’incremento di tali onde, soprattutto nelle regioni occipitali (Oz, O1), si associa infatti ad una riduzione degli stati ansiosi nei soggetti con ansia di tratto elevata. In letteratura è stata inoltre approfondita una specializzazione emisferica della corteccia prefrontale rispetto ai vissuti emozionali: l’attività corticale prevalente nell’area prefrontale destra rispetto a quella sinistra è associata a comportamenti di ritiro ed emozioni negative, mentre la maggiore attività corticale nell’area prefrontale sinistra è legata a comportamenti di avvicinamento ed emozioni positive (Davidson, 1999; Papousek et al., 2014). Poiché le onde alfa sono un indice inverso dell’attività corticale (Cook et al., 1998), una ridotta presenza di bande alfa nei siti frontali destri rispetto a quello sinistro, quindi una maggiore attività corticale nell’area destra, si associa al ritiro e ad emozioni negative (Sutton & Davidson, 1997; Jacobs & Snyder, 1996; Papousek et al., 2014). Al contrario, una riduzione delle onde alfa nelle aree frontali sinistre, ossia un’attività corticale prevalente in queste aree, correla con atteggiamenti e comportamenti di approccio ed emozioni positive (Sutton & Davidson, 1997; Tomarken et al., 1992). Inoltre, la ridotta presenza di onde alfa nelle aree frontali sinistre si associa ad una maggiore flessibilità e regolazione emotiva (Papousek et al., 2012; Jackson et al., 2003). Il neurofeedback può quindi essere utile anche nel modulare l’asimmetria emisferica prefrontale, aumentando o riducendo le onde alfa in tali siti (Harmon-Jones et al., 2008; Peeters et al., 2014; Mennella et al., 2017), al fine di migliorare la regolazione emotiva (Rosenfeld et al., 1995) e di ridurre l’ansia e lo stress

(Marzbani et al., 2016).

Un filone di ricerca si è invece dedicato nello specifico allo studio delle onde alfa superiori e al loro impatto a livello di processi cognitivi, evidenziando che gli interventi mirati a incrementare tali onde sui siti frontali (F3, F4) e parieto-occipitali (P3, Pz, P4, O1, O2) si associano ad un miglioramento della velocità di elaborazione cognitiva e delle funzioni esecutive (Angelakis et al., 2007; Zoefel et al., 2011). Inoltre, Hanslmayr e colleghi (2005) hanno confermato che il potenziamento delle onde alfa superiori correla con una prestazione cognitiva superiore, suggerendo quindi che tali onde possano produrre per il cervello una forma di inibizione verso le interferenze ambientali irrilevanti.

Oltre alla regolazione emotiva e all'ottimizzazione delle prestazioni cognitive, il neurofeedback per il potenziamento delle onde alfa viene utilizzato anche come tecnica analgesica: in particolare, si sono dimostrati efficaci nella riduzione del dolore i training mirati ad ottenere una frequenza di 9 o 10 Hz (Marzbani et al., 2016). Tali protocolli, nello specifico quelli mirati alla frequenza di 10 Hz, si sono rivelati inoltre efficaci nell'ottenere un rilassamento muscolare profondo associato alla regolazione del ritmo respiratorio e alla diminuzione del ritmo cardiaco (Dempster, 2012; Vernon, 2005).

L'attività corticale beta è un buon indicatore delle prestazioni cognitive (Vernon et al., 2003): le onde beta sono infatti associate a concentrazione sostenuta, accuratezza consapevole e abilità di risoluzione di problemi (Marzbani et al., 2016). Al contrario, pattern corticali deficitari di onde beta sono frequentemente riscontrati in disturbi del neurosviluppo come l'ADHD, dove si osserva un elevato rapporto tra onde theta e onde beta (Lubar, 1991). Il neurofeedback volto ad aumentare le onde beta, specialmente nei siti centrali, si è rivelato utile nel miglioramento delle capacità attentive (Rasey et al., 1995; Egner & Gruzelier, 2001; Fuchs et al., 2003) e nella riduzione della disattenzione, dell'iperattività e dell'impulsività (Lubar et al., 1995). Allo stesso tempo, i protocolli mirati all'aumento delle onde beta si associano a miglioramenti nell'efficienza cognitiva legata alla qualità del sonno, riducendo l'affaticamento (Marzbani et al., 2016). Inoltre, il neurofeedback finalizzato all'aumento delle onde SMR riduce ansia, rabbia e stress (Egner & Gruzelier, 2004; Vernon, 2005). Sebbene il potenziamento delle onde beta sia fondamentale per le funzioni esecutive, la letteratura sottolinea la necessità di distinguere le diverse sotto-bande di frequenza: le onde *high* beta si associano infatti a

stati di iper-vigilanza e ansia generalizzata (Hammond, 2005; Perlis et al., 2001). L'inibizione attraverso neurofeedback delle *high* beta si associa ad un miglioramento delle prestazioni cognitive e attentive (Egner & Gruzelier, 2001; Vernon et al., 2003) e della sensibilità percettiva, mantenendo nell'individuo uno stato di allerta ottimale volto a ridurre i tempi di reazione e a migliorare la discriminazione degli stimoli ambientali (Egner & Gruzelier, 2001).

I protocolli theta/alfa, mirando all'aumento delle onde theta riducendo al contempo le onde alfa, sono fra i training neurofeedback più popolari per la riduzione dello stress (Gruzelier, 2009; Raymond et al., 2005). Le onde theta nelle aree fronto-mediali si associano infatti alla transizione dalla veglia al sonno (Hasan & Broughton, 1994) e ad una ridotta attivazione simpatica, caratterizzata da una diminuzione del ritmo cardiaco (Kubota et al., 2001). Tali protocolli vengono eseguiti tipicamente ad occhi chiusi, una condizione che favorisce l'emergere di onde cerebrali a ritmo lento e quindi si accompagna a stati di rilassamento profondo come la fase non-REM del sonno, la meditazione e l'ipnosi (Vaitl et al., 2005). Il feedback in tali protocolli è costituito da segnali uditivi (Thompson & Thompson, 2003), tipicamente suoni naturali come l'infrangersi delle onde sulla spiaggia o il suono di un ruscello (Gruzelier, 2009), che accompagnano l'individuo verso l'ottimizzazione del rapporto theta/alfa.

La letteratura evidenzia l'efficacia dei protocolli theta/alfa non solo per la riduzione dello stress. Tali training vengono infatti utilizzati nel trattamento di stati depressivi profondi, dipendenze, disturbi d'ansia ed episodi traumatici, ma anche per favorire l'incremento della creatività e della performance musicale (Marzbani et al., 2016; Gruzelier, 2009). I training volti a migliorare la frequenza theta inducono quindi l'ingresso nello stato ipnagogico, ossia la fase di transizione tra la veglia e il sonno (Gruzelier, 2009). I protocolli più moderni, al fine di preservare tale stato, possono integrare l'inibizione delle onde delta per prevenire l'addormentamento e delle onde *high* beta per neutralizzare eventuali stati di iper-arousal (Othmer & Othmer, 2009; Hammond, 2011; Thompson & Thompson, 2003).

I protocolli di neurofeedback focalizzati sulle onde delta, in particolare sulla frequenza compresa tra 1 e 3 Hz, vengono invece utilizzati per indurre il rilassamento di contrazioni muscolari acute (ipertono miogeno), offrendo anche un efficace supporto nel trattamento delle cefalee e dei traumi cranici (Marzbani et al., 2016).

Le onde gamma, caratterizzate dalla frequenza più elevata tra le oscillazioni cerebrali, si osservano principalmente nell'ippocampo, dove risultano di fondamentale importanza per l'elaborazione cognitiva e la memoria (Staufenbiel et al., 2014). L'attività gamma nell'ippocampo e nella corteccia prefrontale è infatti correlata alla formazione e al recupero dei ricordi e la coerenza delle oscillazioni gamma in tali aree contribuisce a determinare l'efficienza dei processi di codifica e richiamo (Marzbani et al., 2016), rendendo il training volto ad aumentare le onde gamma un possibile strumento per il potenziamento delle prestazioni cognitive (Staufenbiel et al., 2014). Il neurofeedback volto ad incrementare le onde gamma viene quindi impiegato per promuovere la cognizione, l'acutezza mentale e la risoluzione di problemi (Marzbani et al., 2016). Tali training migliorano infatti le capacità di calcolo, l'organizzazione del cervello, la velocità di elaborazione delle informazioni e la memoria a breve termine (Hughes, 2008; Vernon, 2005). Infatti, mentre i ritmi elettrocerebrali lenti agiscono sulle funzioni omeostatiche, le onde gamma sono considerate il marker dei processi cognitivi complessi: una loro fondamentale funzione è quella del *binding*, ossia la capacità del cervello di integrare tra loro informazioni sensoriali distinte, come forma e colore, in un'unica percezione (Treisman, 1996). Il meccanismo ipotizzato in letteratura per l'integrazione delle varie caratteristiche sensoriali è il *temporal coupling*, ossia l'accoppiamento temporale di popolazioni neurali ottenuto dalla sincronizzazione nei ritmi di scarica dei neuroni riferiti allo stesso evento (Keizer et al., 2010). Tale sincronizzazione permette quindi di codificare stimoli diversi attraverso la coerenza temporale delle scariche neuronali nella frequenza gamma (Engel & Singer, 2001). Un contributo utile per la comprensione di questi processi è lo studio di Keizer e colleghi (2010), i quali hanno impiegato il neurofeedback per la modulazione della potenza gamma e ne hanno osservato gli effetti sulle prestazioni cognitive. Dai risultati emerge che i soggetti che hanno aumentato la potenza gamma tramite il neurofeedback hanno dimostrato una riduzione dei costi di *binding* visivo, facilitando l'integrazione tra più informazioni e migliorando la gestione degli *event files*, ossia l'efficienza nel recupero e nell'aggiornamento dei collegamenti tra le caratteristiche (Hommel, 2004). Inoltre, lo studio ha evidenziato una correlazione positiva significativa tra la capacità di incrementare la potenza gamma e il punteggio dell'intelligenza fluida, misurata

attraverso le Matrici Progressive di Raven (1938). Secondo Keizer e colleghi (2010), i risultati appena descritti suggeriscono quindi che il *binding* e l'intelligenza fluida possano condividere un meccanismo sottostante comune, identificabile nella sincronizzazione neurale ad alta frequenza. Di conseguenza i protocolli gamma si rivelano una strategia utile per il potenziamento cognitivo, capace di ottimizzare l'efficienza dei processi di integrazione e la flessibilità del ragionamento logico-astratto.

4.2 Applicazioni del neurofeedback per la performance sportiva

Il primo impiego del neurofeedback per il miglioramento della performance sportiva risale agli inizi degli anni '90, quando Landers e colleghi (1991) dimostrarono che il training con feedback EEG migliorava le prestazioni negli atleti di tiro con l'arco. Successivamente il neurofeedback ha trovato più ampia applicazione nel contesto dell'ottimizzazione della performance sportiva su aspetti cognitivi, emotivi e comportamentali (Tosti et al., 2024a). In generale, l'eccellenza della prestazione atletica è definita da un insieme di fattori critici: la rapidità nei tempi di reazione (Mirifar et al., 2017), l'efficienza delle funzioni cognitive, quali attenzione, memoria, concentrazione, focalizzazione e controllo inibitorio (Liu et al., 2017), la precisione delle abilità percettivo-motorie, come la coordinazione oculo-manuale (Cheng et al., 2015) e la precisione nel tiro (Salimnejad et al., 2019), e la gestione degli stati emotivi, tra cui l'ansia (Domingos et al., 2021). L'individuazione di protocolli neurofeedback in grado di potenziare tali fattori risulta quindi di fondamentale importanza per il miglioramento della performance negli atleti (Tosti et al., 2024a).

Tuttavia, l'efficacia del neurofeedback nell'ottimizzazione della performance sportiva non appare universale, dimostrando talvolta risultati contrastanti (Dupee, 2008; Mirifar et al., 2019). Tali risultati evidenziano che gli effetti del neurofeedback sugli atleti potrebbero dipendere da vari fattori, come la disciplina specifica e il protocollo utilizzato (Tosti et al., 2024a). Ad esempio, il protocollo mirato all'incremento del ritmo SMR si è dimostrato efficace nel migliorare la precisione in discipline come il tiro a segno e il golf, dove il controllo motorio fine e l'attenzione sostenuta sono requisiti fondamentali per il successo (Cheng et al., 2015). Il training destinato alla modulazione delle onde beta, invece, ha favorito la reattività cognitiva in atleti di judo, taekwondo scherma e nuoto, dove la rapidità decisionale e i tempi di reazione sono essenziali

(Mikicic et al., 2015). Ancora, l'incremento delle onde alfa si è dimostrato utile per atleti di discipline che richiedono elevate capacità visuo-spaziali e uno stato di rilassamento vigile, come ad esempio le freccette (Norouzi et al., 2020). Inoltre, il livello di expertise dell'atleta è una variabile determinante per l'efficacia del neurofeedback. Negli atleti principianti, infatti, il neurofeedback agisce principalmente sul consolidamento delle abilità di base, migliorando ad esempio il controllo motorio e riducendo i tempi di reazione. Al contrario, negli atleti élite, i benefici si concentrano sul miglioramento della focalizzazione e sulla gestione dell'ansia, necessari per operare in contesti di alta pressione (Tosti et al., 2024a).

Sulla base di queste premesse, appare chiaro che l'applicazione del neurofeedback debba essere personalizzata, tenendo conto delle caratteristiche dell'atleta e della disciplina praticata. Di seguito verranno presentate le aree di intervento in ambito sportivo in cui il neurofeedback ha dimostrato risultati più significativi per l'ottimizzazione della performance.

4.2.1 Ottimizzazione dell'efficienza cognitiva e della reattività motoria

Ogni prestazione sportiva richiede capacità cognitive (Liu et al., 2017) e rapidità nei tempi di reazione (Mirifar et al., 2017). Il tempo di reazione è il tempo che intercorre tra il momento in cui uno stimolo viene percepito e il momento in cui si genera una risposta motoria a tale stimolo (Welford et al., 1980) e viene utilizzato per valutare le risorse cognitive dell'atleta (Mirifar et al., 2017), riflettendo la capacità dell'individuo di elaborare decisioni e avviare azioni in modo rapido (Araújo et al., 2019).

La revisione sistematica e meta-analisi di De Brito e colleghi (2022) ha valutato l'impatto del neurofeedback sulle prestazioni cognitive e sui tempi di reazione negli atleti, dimostrando che il neurofeedback è uno strumento efficace nel miglioramento di tali aspetti. Tra le prestazioni cognitive fondamentali in ambito sportivo vi è, ad esempio, l'attenzione: lo studio di Liu e colleghi (2017) ha impiegato il neurofeedback per aumentare il rapporto beta inferiori/theta negli atleti di tiro a segno specializzati in carabina. Tale rapporto si traduce in un incremento delle onde beta inferiori, associate ad uno stato di allerta calmo, e ad una riduzione delle oscillazioni theta, legate a cali di concentrazione. Il training ha portato ad un miglioramento dell'attenzione sostenuta: tale risultato suggerisce che la modulazione del rapporto beta inferiori/theta non solo faciliti la focalizzazione immediata, ma permetta anche di rendere l'atleta più resiliente

alla fatica mentale e di mantenere quindi l'efficienza delle proprie abilità cognitive anche in sessioni di allenamento o gara prolungate. L'aumento dell'attenzione, inoltre, è associato anche ad un incremento del ritmo SMR (Vernon et al., 2003): lo studio di Cheng e colleghi (2015) ha dimostrato che l'aumento di tale ritmo nei golfisti era associato a migliori prestazioni nel *putting*. Tale miglioramento potrebbe essere dovuto alla capacità degli atleti di inibire i processi cognitivi irrilevanti per il compito (Wang et al., 2020). Il neurofeedback migliora anche le funzioni cognitive relative alla memoria (Zoefel et al., 2011): negli atleti tale aspetto è stato evidenziato a livello della memoria a breve termine (Domingos et al., 2020) e della memoria di lavoro (Domingos et al., 2021).

Un contributo fondamentale sul neurofeedback e il relativo miglioramento dei tempi di reazione deriva dallo studio di Parsae e colleghi (2018), i quali hanno analizzato l'effetto della modulazione delle onde SMR e delle onde theta sui tempi di reazione visivi e uditivi, dimostrandone l'utilità nel ridurre la latenza delle risposte e ottimizzando quindi la comunicazione tra le aree sensoriali e la corteccia motoria. Mikicic e colleghi (2015) hanno studiato gli effetti su atleti di diverse discipline di un training focalizzato sul potenziamento delle onde beta inferiori e SMR, unito ad una soppressione delle onde theta e beta superiori. I risultati hanno confermato che tale training può accelerare la risposta motoria agli stimoli visivi, migliorando la capacità degli atleti di reagire prontamente in situazioni competitive dinamiche.

Alcune evidenze in letteratura suggeriscono che la diminuzione dei tempi di reazione possa non influire negativamente sulla precisione del gesto tecnico: il rafforzamento dei processi esecutivi ottenuto dal neurofeedback sembrerebbe favorire un equilibrio tra rapidità e accuratezza, limitando cali di attenzione e risposte troppo impulsive che porterebbero ad errori di selezione e valutazione dello stimolo (Liu et al., 2017).

4.2.2 Precisione del gesto tecnico e abilità percettivo-motorie

La precisione del gesto tecnico è il risultato dell'integrazione delle attività della corteccia prefrontale, responsabile della pianificazione e della gestione del processo decisionale, e della corteccia motoria, deputata all'esecuzione dei movimenti (Miller & Cohen, 2001; Milton et al., 2007).

Nello studio di Milton e colleghi (2007), dedicato all'approfondimento della

pianificazione motoria nei golfisti, è emerso che prima del tiro gli atleti esperti attivano una rete neurale precisa per la pianificazione motoria, la quale integra le informazioni visive con i comandi motori. Al contrario, nei golfisti principianti tale rete appare organizzata in modo più diffuso, essendo ancora impegnati nel processo di apprendimento: si sono rilevati, infatti, il coinvolgimento del sistema limbico e l'attivazione dei gangli della base, i quali invece non si attivano negli esperti (Packard & Knowlton, 2002). Negli esperti si attivano infatti circuiti neurali principalmente nelle aree deputate alle trasformazioni visuo-motorie, come il lobulo parietale superiore e il lobo occipitale. Tale discrepanza di attivazione suggerisce, secondo gli autori, che il principiante operi in uno stato di attenzione globale e non selettiva (Raichle et al., 2001), avendo quindi difficoltà nel filtrare gli stimoli sensoriali e cognitivi irrilevanti per il compito. La complessa attivazione cerebrale nei principianti, mediata dalla corteccia cingolata posteriore e dalla corteccia frontale mediale, riflette quindi un processo decisionale conscio e ancora lontano dall'automatismo del gesto tecnico tipico degli esperti (Firth et al., 1991). Inoltre, l'iperattivazione di gangli della base e delle aree limbiche può avere un impatto negativo sulla contrazione muscolare: tale fenomeno, noto come *conditionally permitted movement* (Cotterill, 2001), suggerisce che un'eccessiva attività in queste regioni sottocorticali neghi alle aree motorie della corteccia un'attivazione sufficiente (Milton et al., 2007). Nello specifico, l'attivazione della corteccia sensoriale primaria, del cervelletto e dei gangli della base inibisce l'attivazione della corteccia motoria primaria (Cotterill, 2001), mentre l'attivazione nelle aree limbiche e paralimbiche diminuisce l'attività delle aree cognitive corticali deputate alla pianificazione motoria e alla ricompensa (Pochon et al., 2002).

Il training neurofeedback può essere quindi un valido strumento per modulare la comunicazione tra le aree prefrontali e motorie, favorendo il passaggio da un controllo conscio e frammentato, tipico dei principianti, ad un automatismo fluido, associato agli esperti. Nello specifico, il potenziamento delle onde SMR è associato ad una ridotta interferenza somatosensoriale (Mann et al., 1996; Egner & Gruzelier, 2001, 2004). Come dimostrato da Cheng e colleghi (2015), la prestazione degli esperti in una disciplina di precisione, come le freccette, è preceduta da una maggiore potenza SMR rispetto a quella rilevata nei principianti. Tale differenza può essere spiegata dal fatto che un'elevata presenza delle oscillazioni SMR riflette uno stato di stand-by delle vie

talamocorticali, somatosensoriali e somatomotorie integrate (Stermann & Egner, 2006). Al contrario, una bassa attività SMR si associa ad un'eccessiva dipendenza dai feedback sensoriali esterni e ad una pianificazione motoria frammentata e meno fluida (Milton et al., 2007). Lo stato di "stand-by neurale" permette quindi all'atleta di passare da un'elaborazione somato-motoria consapevole e faticosa a livello cognitivo a un processo motorio caratterizzato da un investimento minimo attentivo (Schneider & Shrifin, 1977). In altre parole, mentre il principiante è costretto a monitorare costantemente ogni feedback cinestetico per programmare il tiro, l'esperto riesce a eseguire il gesto come un unico blocco motorio automatizzato, chiamato *chunk* (Masters, 1992), minimizzando lo sforzo cognitivo (Cheng et al., 2015).

Il neurofeedback può quindi ottimizzare la precisione del gesto tecnico agendo sulle abilità percettivo-motorie, favorendo l'efficienza di attivazione cerebrale tipica degli esperti attraverso il potenziamento del ritmo SMR (Cheng et al., 2015).

4.2.3 Autoregolazione emotiva e gestione dell'ansia

La letteratura scientifica sull'ottimizzazione della performance ha sottolineato come la prestazione non dipenda solamente dalle abilità tecniche, ma sia il risultato dell'interazione tra fattori motori, cognitivi ed emotivi (Tosti et al., 2024a).

Un'applicazione del neurofeedback in ambito sportivo è il protocollo di rilassamento, finalizzato alla regolazione emozionale e alla gestione dello stress. A differenza dei training focalizzati al potenziamento dell'attenzione, tale protocollo opera attraverso il potenziamento delle onde theta e la contestuale inibizione del ritmo alfa nella regione parietale (Gong et al., 2021). La modulazione cerebrale appena descritta permetterebbe all'atleta di accedere ad uno stato di "silenzio profondo", caratterizzato da un rilassamento mentale in cui l'atleta sarebbe in grado di richiamare alla mente vividi dettagli ed emozioni dell'allenamento agonistico, favorendo anche l'emergere del pensiero creativo (Gruzelier, 2009). L'efficacia di tale protocollo in ambito sportivo è stata rilevata soprattutto nel miglioramento di performance artistiche, come la danza (Raymond et al., 2005; Gruzelier et al., 2013). Gong e colleghi (2021) ipotizzano però che tali benefici possano estendersi ad altre discipline sportive che richiedano una componente creativa, come il pattinaggio di figura o la ginnastica ritmica.

Il neurofeedback può essere anche impiegato nel ridurre l'ansia negli atleti. Ad

esempio, lo studio di Faridnia e colleghi (2012) ha analizzato gli effetti del neurofeedback su nuotatrici élite in età adolescenziale. Nello specifico, sono stati impiegati due protocolli posizionando gli elettrodi in corrispondenza delle aree corticali C3 e C4: un protocollo era finalizzato all'aumento dell'attività SMR e alla riduzione delle onde theta e beta superiori, mentre l'altro protocollo era impiegato per l'incremento dell'attività delle beta inferiori e la diminuzione delle onde beta superiori. Gli autori hanno osservato una riduzione statisticamente significativa dei livelli di ansia competitiva a seguito del training e hanno collegato tale risultato al miglioramento della consapevolezza del proprio stato di arousal. Attraverso il feedback visivo delle proprie onde cerebrali, le nuotatrici hanno infatti appreso l'inibizione dei pattern neurofisiologici disfunzionali associati allo stress (Faridnia et al., 2012), favorendo l'ingresso nella propria zona di prestazione massima (Hanin, 2000). Come evidenziato da Mirifar e colleghi (2017), il neurofeedback non si limita al miglioramento temporaneo dello stato psicofisico dell'atleta, come appunto la riduzione dell'ansia, ma promuove la padronanza dell'autoregolazione del proprio stato mentale. Si propone quindi un collegamento tra l'autocontrollo emotivo e il successo agonistico: gli individui che hanno acquisito la capacità di regolare il proprio stato mentale hanno maggiori probabilità di raggiungere prestazioni eccellenti rispetto a coloro che non ci riescono (Gong et al., 2021).

È necessario inoltre sottolineare che l'apprendimento dell'autoregolazione attraverso il neurofeedback non deve essere considerato unicamente come supporto alla prestazione sportiva, ma come un'abilità capace di influenzare altre sfere della vita dell'atleta e di consolidarsi come una risorsa adattiva permanente (Collura, 2013; Mirifar et al., 2017).

4.3 Neurofeedback nel recupero da infortunio

La pratica sportiva espone inevitabilmente l'atleta al rischio di infortuni, i quali implicano non solo una compromissione a livello fisico, ma anche un cambiamento nell'integrità neurofisiologica e psicologica dell'individuo. Il recupero non può essere quindi limitato alla sola dimensione biologica, ma richiede una prospettiva biopsicosociale che integri gli aspetti legati allo stress emotivo e alla motivazione durante la riabilitazione (Brewer & Redmond, 2017). L'infortunio causa infatti uno stato di distress e di iper-arousal che può ostacolare i processi di riparazione cellulare e

l'aderenza al processo riabilitativo (Arvinen-Barrow & Clement, 2024). In tale condizione si verifica spesso la kinesiofobia, ossia la paura irrazionale del re-infortunio legata all'iper-attivazione dei circuiti neurali deputati all'allerta e ad una conseguente tensione muscolare protettiva che ostacola la fluidità del movimento nell'area lesionata (Heil, 1993; Vlaeyen & Linton, 2000; Kim et al., 2023).

Il neurofeedback può essere quindi uno strumento utile da integrare nella riabilitazione, agendo sulla neuroplasticità per ripristinare i pattern cerebrali ottimali (Conder & Conder, 2014). Fornendo feedback immediati sulla propria attività cerebrale, il neurofeedback soddisfa inoltre i bisogni di autonomia e competenza (Ryan & Deci, 2000) dell'atleta, conducendolo ad un senso di autoefficacia e trasformando la riabilitazione in un processo attivo di ottimizzazione dell'autoregolazione (Levy et al., 2008; Anil et al., 2022).

I benefici del neurofeedback durante la riabilitazione sono ancora più evidenti nel caso delle concussioni cerebrali, dove l'integrità del sistema nervoso è direttamente compromessa (Conder & Conder, 2014). In questo caso, il neurofeedback può intervenire direttamente sulle conseguenze derivanti dalla sindrome post-concussiva refrattaria, favorendo il ripristino della coerenza inter-emisferica e delle capacità cognitive alterate in seguito al trauma (McCrea et al., 2010; Barr et al., 2012; Conder & Conder, 2014).

Il neurofeedback è quindi uno strumento chiave nella prospettiva biopsicosociale della riabilitazione, integrando il recupero dell'attività neurofisiologica e la gestione degli stati emotivi e motivazionali (Brewer & Redmond, 2017). Le possibili applicazioni del neurofeedback nel recupero da infortunio verranno di seguito specificate.

4.3.1 Riabilitazione post-concussione cerebrale

Sebbene l'attività sportiva, soprattutto tra i più giovani, offra benefici di sviluppo fisico, intellettuale e sociale (Bailey, 2006; Hillman et al., 2008; Warburton et al., 2006), esiste anche il rischio dell'infortunio, tra cui le concussioni cerebrali (Weiß et al., 2012). Le concussioni cerebrali legate allo sport (SRC) sono classificate come lesioni cerebrali traumatiche lievi e il recupero avviene solitamente in una o due settimane, anche se certi sintomi possono perdurare più a lungo. Le SRC sono legate prevalentemente a discipline come il ciclismo, il football americano, il calcio e il basket (Conder &

Conder, 2014). Inoltre, le atlete mostrano una suscettibilità maggiore alle SRC rispetto agli uomini in tutte le discipline e le età, probabilmente a causa del minor spessore cranico, dei muscoli del collo più piccoli e delle differenze ormonali (McCrory et al., 2013). Secondo la task force dell'Organizzazione Mondiale della Sanità il quadro clinico delle SRC è caratterizzato da una risoluzione progressiva della sintomatologia, con qualche evidenza scientifica che indica la persistenza di deficit significativi a livello cognitivo, comportamentale o nel rendimento accademico in alcuni soggetti (Carroll et al., 2004). Dalla revisione integrativa della letteratura di McCrea e colleghi (2009) emerge che negli atleti di football americano i deficit sono più evidenti nelle ore immediatamente successive al trauma e tendono a risolversi gradualmente in pochi giorni, spesso non registrando differenze rispetto ai soggetti sani ad una sola settimana di distanza dalla concussione. Tali dati riflettono la “cascata neurometabolica” osservata da Giza e Hovda (2001), composta da una serie di eventi ionici, metabolici e fisiologici. Gli autori sottolineano però che i traumi cranici nei cervelli in via di sviluppo possono alterare il potenziale cognitivo a lungo termine, anche in assenza di deficit immediati. È quindi fondamentale monitorare bambini e adolescenti che hanno subito una lesione di questo tipo, al fine di rilevare la possibile insorgenza di un’anomalia neurocomportamentale tardiva. Inoltre, subire un secondo trauma in una breve finestra temporale può causare danni di maggiore entità rispetto a due episodi isolati ed è dunque necessario comprendere la fisiopatologia post-concussione al fine di definire tempistiche sicure per il ritorno all’attività fisica (McCrory et al., 2017). Proprio per tutelare l’atleta in questa fase di vulnerabilità metabolica, il trattamento raccomandato per il recupero prevede un riposo assoluto, fisico e cognitivo, astenendosi quindi sia dalle competizioni e da qualsiasi sessione di allenamento sia da attività cognitive impegnative (Valovich McLeod & Gioia, 2010).

Un elemento critico delle SRC è la percentuale di atleti (circa il 10-20%) che non mostra il rapido recupero atteso, ritrovandosi quindi nella “sindrome post-concussiva refrattaria” (Conder & Conder, 2014). In tale situazione uno strumento di intervento con grande potenziale è il neurofeedback: gli studi EEG di McCrea e collaboratori (2010) e di Barr e colleghi (2012) hanno infatti evidenziato che negli atleti che avevano subito una concussione si rilevava una ridotta coerenza inter-emisferica e una ridotta attività beta, correlata alla diminuzione della capacità di concentrazione. Tali anomalie

nell'EEG, inoltre, si riscontravano più a lungo della compromissione rilevata dai test neurocognitivi, mostrando un incremento fino all'ottavo giorno post-infortunio e rimanendo presenti in alcuni atleti fino al 45° giorno. Il neurofeedback si propone quindi di intervenire su queste due anomalie, favorendo il ripristino dei pattern cerebrali ottimali (Conder & Conder, 2014; Ledwige et al., 2024). In particolare, Conder e Conder (2014) richiamano l'attenzione sui contributi di Linden (2013), il quale ha documentato attraverso i suoi casi studio l'efficacia dell'impiego del neurofeedback su atleti concussi, e di Tinius e Tinius (2002), i quali hanno ottenuto lievi miglioramenti significativi nell'attenzione sostenuta in giovani adulti con lesioni cerebrali. Tali risultati evidenziano quindi il potenziale del neurofeedback nel favorire il ripristino di capacità cognitive spesso compromesse nella sindrome post-concussiva refrattaria.

L'evoluzione tecnologica ha recentemente introdotto strumenti di neurofeedback basati sulla *gamification*, progettati soprattutto per favorire l'aderenza alla terapia post-concussione da parte dei più giovani: il training viene infatti integrato in una simulazione videoludica a carattere sportivo, in cui l'atleta interagisce con l'ambiente attraverso la modulazione dei propri pattern cerebrali (Conder & Conder, 2014). Inoltre, l'integrazione del neurofeedback in simulazioni sportive sfrutta i benefici del *mental imagery* (Feltz & Landers, 1983; Jeannerod, 1995), mantenendo attive le mappe motorie corticali dell'atleta anche durante il periodo di riposo fisico assoluto post-concussione (Conder & Conder, 2014).

Tuttavia, è stato rilevato che l'eccessivo e continuo carico cognitivo richiesto dai protocolli neurofeedback di tipo visivo può riacutizzare la sintomatologia nelle prime fasi post-concussive. Per ovviare a tale criticità, si suggerisce l'impiego alternato di feedback uditivi (Conder & Conder, 2014).

4.3.2 Regolazione di stress e motivazione durante la riabilitazione

L'infortunio subito dall'atleta dovrebbe essere affrontato con una prospettiva biopsicosociale: vi rientrano infatti, oltre alle dinamiche del sistema muscoloscheletrico, anche aspetti legati allo stress emotivo e alla motivazione (Brewer & Redmond, 2017). Le componenti psicologiche agiscono come veri e propri determinanti biologici del recupero, considerando che lo stress si traduce in una risposta neurochimica che può interferire con i processi di riparazione cellulare (Glaser & Kiecolt-Glaser, 2005). Come sottolineato da Wiese-Bjornstal e colleghi (1998), infatti, il recupero da infortunio è un

processo bidirezionale: il miglioramento fisico influenza positivamente l'assetto psicologico dell'atleta e, allo stesso tempo, uno stato psicologico resiliente facilita il ritorno alla performance.

L'iper-arousal corticale derivante dall'infortunio evidenzia come l'infortunio stesso dia origine allo stress (Wiese-Bjornstal et al., 1998). Tale stato di attivazione, evidenziato dall'incremento delle onde beta superiori, si associa alla ruminazione mentale (Thompson & Thompson, 2003). La ruminazione mentale potrebbe costituire nell'atleta un'incapacità di inibire i pensieri negativi collegati all'infortunio, ostacolando anche la focalizzazione sul processo di riabilitazione (Arvinen-Barrow & Clement, 2024). L'efficacia del neurofeedback nel ridurre l'iper-arousal è data dalla sua capacità di inibire le frequenze beta, disfunzionali in questo contesto, a favore di onde che promuovono il rilassamento vigile, come le frequenze alfa o il ritmo sensorimotorio (Hammond, 2011).

L'integrazione del neurofeedback nel processo di riabilitazione potrebbe inoltre favorire la motivazione, contrastando quindi il senso di impotenza appresa che spesso compare nelle fasi di stallo del recupero fisico (Arvinen-Barrow & Clement, 2024). Secondo la *Self-Determination Theory* di Ryan e Deci (2000), la persistenza dell'individuo in un compito gravoso, come appunto la riabilitazione, è mediata dal soddisfacimento dei bisogni di autonomia e competenza. Il neurofeedback soddisfa tali bisogni nell'atleta attraverso i feedback immediati sulla capacità di modulare la propria attività neurale, aumentando quindi nell'individuo il senso di autoefficacia e facendogli percepire di essere un partecipante attivo nel processo di riabilitazione (Anil et al., 2022).

Le premesse teoriche presentate appaiono promettenti per l'integrazione del neurofeedback nel processo riabilitativo al fine di gestire lo stress e di sostenere la motivazione: tale strumento permette infatti di ridurre il carico allostatico indotto dalle emozioni negative e di agire sul sistema dopaminergico legato alla ricompensa, trasformando il periodo di inattività sportiva in un momento di ottimizzazione dell'autoregolazione (Gruzelier, 2014). L'acquisizione di tale capacità di regolare il proprio stato emotivo fornisce infatti all'atleta un senso di autoefficacia, il quale risulta tra i fattori correlati all'aderenza alla riabilitazione (Levy et al., 2008).

4.3.3 Trattamento della kinesiofobia

La kinesiofobia è uno dei maggiori ostacoli psicologici al processo di riabilitazione e al successivo ritorno allo sport (Arden et al., 2013a). Tale paura irrazionale, derivante da un senso di eccessiva vulnerabilità ad un re-infortunio, non è un mero costrutto psicologico: la kinesiofobia si associa infatti ad un'iper-attivazione dei circuiti neurali relativi alla paura, come l'amigdala, la corteccia orbitofrontale, l'insula e il giro paraippocampale (Kim et al., 2023). L'iper-attivazione appena descritta si traduce a livello di EEG in un incremento delle frequenze beta superiori, segnale di un arousal corticale che mantiene l'individuo in uno stato di allerta costante (Thompson & Thompson, 2003).

I protocolli neurofeedback finalizzati all'inibizione delle onde beta superiori possono quindi limitare l'attività nei circuiti sopracitati, riducendo la percezione di minaccia associata al movimento (Roy et al., 2020). Inoltre, anche il rinforzo delle onde SMR in tali aree potrebbe essere utile nel contrastare la kinesiofobia: l'incremento di tale frequenza è infatti associato ad una diminuzione dell'eccitabilità motoria riflessa e della tensione muscolare protettiva (Serman, 1996; Grinberg et al., 2024), tipiche della paura del re-infortunio (Heil, 1993; Vlaeyen & Linton, 2000).

Sebbene la letteratura non offra ancora evidenze sistematiche sull'uso del neurofeedback per la riduzione della kinesiofobia nell'atleta, i risultati ottenuti dai protocolli citati indicano che il neurofeedback può essere applicato anche in questo contesto. Infatti, l'efficacia comprovata dei protocolli nella modulazione di specifiche onde cerebrali (Serman, 1996; Roy et al., 2020; Grinberg et al., 2024) e la dimostrata alterazione della presenza di tali onde negli stati di paura del re-infortunio (Heil, 1993; Vlaeyen & Linton, 2000) suggeriscono che sono necessari approfondimenti mirati per verificare il potenziale del neurofeedback nel trattamento della kinesiofobia.

CAPITOLO 5

IMPLICAZIONI PRATICHE E PROSPETTIVE FUTURE

5.1 Criticità attuali

Nonostante l'analisi della letteratura condotta nel presente elaborato permetta di evidenziare il potenziale del biofeedback e del neurofeedback come strumenti di autoregolazione nel contesto sportivo, il consolidamento di tali strumenti trova ancora varie resistenze all'interno della comunità scientifica a causa di criticità legate all'aspetto metodologico. Nel tentativo di delineare i confini della ricerca attuale sul biofeedback e sul neurofeedback, verranno di seguito sintetizzati i principali contributi finora citati che ne sottolineano l'efficacia e successivamente verranno esaminate le criticità segnalate in letteratura.

Il biofeedback, soprattutto con tecniche basate sull'HRV, si è rivelato utile negli atleti per l'autoregolazione dell'arousal prima e durante la competizione (Jimenez Morgan & Molina Mora, 2017), associandosi inoltre a significative modificazioni nei livelli di ansia, nell'autoefficacia di coping e nei risultati della prestazione sportiva (Paul & Garg, 2012) e al miglioramento delle abilità motorie (Padaguan et al., 2020). Le abilità motorie possono essere migliorate anche attraverso l'impiego di protocolli elettromiografici di biofeedback, i quali forniscono informazioni sull'attivazione dei singoli muscoli e supportano quindi l'individuazione di contrazioni muscolari eccessive o non necessarie al gesto tecnico in questione (French, 1980; De Luca, 1997), diminuendo l'affaticamento muscolare (Merletti & Farina, 2016; Giggins et al., 2013; Dos Anjos et al., 2024). Inoltre, l'efficacia del biofeedback si estende oltre la prestazione sportiva, rivelandosi utile anche nel recupero post-esercizio fisico (Perez-Gaido et al., 2021; Yilmaz et al., 2025).

Consentendo agli atleti di intervenire consapevolmente per una corretta attivazione muscolare, il biofeedback è inoltre utile nell'ottimizzazione della sincronizzazione neuromuscolare e nella correzione di pattern compensatori disfunzionali a seguito di un infortunio (Campanini et al., 2020; Ananías et al., 2024; Morales-Sánchez et al., 2022; Hernández-Mendo, 2011; Hernández-Mendo & Morales-Sánchez, 2014). Nella fase di

recupero da infortunio il biofeedback si è dimostrato inoltre efficace nella riduzione della catastrofizzazione del dolore e delle risposte psicologiche disadattive, aumentando le probabilità di un ritorno più efficace allo sport (Rollo et al., 2017). Inoltre, il biofeedback può essere anche impiegato nella prevenzione di infortuni futuri (Hernández-Mendo, 2009) migliorando i meccanismi involontari di attivazione muscolare (Inglis et al., 1976; Morales-Sánchez et al., 2022).

Il biofeedback si scontra però con criticità metodologiche derivanti dall'elevata suscettibilità dei parametri fisiologici alle variabili individuali e ambientali. Infatti, fattori come la temperatura e l'umidità ambientale influenzano la risposta fisiologica dell'individuo e, in assenza di una standardizzazione del setting, potrebbe risultare complesso stabilire il grado di controllo esercitato dall'individuo sui propri parametri autonomici (Schwartz & Andrasik, 2003). In risposta alle critiche riguardanti l'effetto placebo implicato nelle tecniche di biofeedback, Frank (1982) suggerisce che il fatto che tale tecnica possa coinvolgere l'effetto placebo non ne sminuisce il valore ma ne conferma anzi l'efficacia, sottolineando la capacità dell'individuo di attivare i propri processi di autoregolazione attraverso la mediazione della tecnologia.

Spostando il focus dai parametri fisiologici periferici a quelli centrali, il neurofeedback si configura come una forma specifica di biofeedback focalizzata sull'attività elettrica cerebrale (Hammond, 2011) e infatti fornisce all'atleta informazioni sui propri ritmi EEG al fine di promuovere pattern neurali più efficienti e funzionali al compito richiesto (Gruzelier, 2014). In letteratura si evidenzia infatti come il neurofeedback possa essere utile nel miglioramento dei tempi di reazione (De Brito et al., 2022; Mikicin et al., 2015) e dell'attenzione sostenuta (Liu et al., 2017), contribuendo a inibire i processi cognitivi interferenti rispetto all'azione da eseguire (Cheng et al., 2015). Il neurofeedback negli atleti è inoltre associato a miglioramenti a livello della memoria a breve termine (Domingos et al., 2020) e della memoria di lavoro (Domingos et al., 2021). Riuscendo a modulare la comunicazione tra le aree prefrontali e motorie, il neurofeedback può essere impiegato anche per migliorare il gesto tecnico, favorendo il passaggio da un controllo conscio e frammentato tipico del principiante ad un automatismo fluido, segno di expertise (Cheng et al., 2015).

Il neurofeedback in ambito sportivo può essere inoltre utile per la regolazione emotiva dell'individuo, inibendo i pattern neurofisiologici disfunzionali associati allo stress e riducendo quindi l'ansia (Faridnia et al., 2012).

Similmente al biofeedback, il neurofeedback in ambito sportivo può essere impiegato anche nel recupero da infortunio. Ricevendo feedback immediati sulla propria attività cerebrale, il neurofeedback soddisfa nell'atleta i bisogni di autonomia e competenza (Ryan & Deci, 2000), potenziando il senso di autoefficacia e riducendo la passività del percorso riabilitativo (Levy et al., 2008; Anil et al., 2022). L'efficacia del neurofeedback è ancora più evidente nel trattamento delle concussioni cerebrali, infortuni legati prevalentemente a ciclismo, football americano, calcio e basket (Conder & Conder, 2014), supportando il ripristino della coerenza inter-emisferica e delle capacità cognitive alterate dal trauma (Conder & Conder, 2014; Linden, 2013; McCrea et al., 2010). Inoltre, l'evoluzione tecnologica ha portato all'introduzione di protocolli di neurofeedback basati sulla *gamification*, integrando il training in simulazioni multimediali a carattere ludico e favorendo quindi l'aderenza alla riabilitazione, specialmente tra i giovani atleti (Conder & Conder, 2014). In aggiunta, tali protocolli sfruttano i benefici del *mental imagery* (Feltz & Landermans, 1983; Jeannerod, 1995) e consentono quindi di mantenere attive nell'atleta le mappe motorie corticali anche durante il riposo fisico forzato a seguito dell'infortunio (Conder & Conder, 2014).

L'integrazione del neurofeedback nel processo riabilitativo appare anche utile al fine di gestire lo stress e di sostenere la motivazione: tali protocolli agiscono riducendo il carico allostatico indotto dalle emozioni negative e stimolando il sistema dopaminergico legato alla ricompensa, trasformando così il periodo di inattività sportiva in un momento di ottimizzazione dell'autoregolazione (Gruzelier, 2014). Il neurofeedback potrebbe essere anche un utile intervento per la kinesiophobia, riuscendo a modulare l'attivazione dei circuiti neurali associati alla paura e riducendo la percezione di minaccia associata al movimento (Roy et al., 2020) e la tensione muscolare protettiva (Serman, 1996).

Sebbene il biofeedback e il neurofeedback condividano il principio dell'autoregolazione, dalla meta-analisi di Zhang e colleghi (2025) risulta che il biofeedback ha effetti statisticamente significativi soprattutto sul miglioramento della salute mentale negli atleti. In particolare, da tale meta-analisi risulta che il biofeedback è

particolarmente efficace per la regolazione di ansia e stress negli atleti, favorendo la transizione da modalità di adattamento reattive a strategie di coping proattive e aumentando di conseguenza la resilienza mentale in contesti agonistici ad alta pressione (Donghai et al., 2024). Il neurofeedback, invece, ha dimostrato effetti statisticamente significativi soprattutto nel potenziamento delle prestazioni cognitive (Zhang et al., 2025), in particolare per l'ottimizzazione della performance in discipline che richiedono un elevato controllo motorio fine e una coordinazione sensomotoria sofisticata, unitamente ad un elevato grado di controllo attentivo e ad una rapidità decisionale (Zhang et al., 2025). Infatti, agendo direttamente sulle funzioni cognitive superiori e riuscendo a ridurre le interferenze cognitive (Rydzik et al., 2023), il neurofeedback instaura nell'atleta un duplice potenziamento: affina l'efficienza sensomotoria per l'esecuzione fisica e rinforza la resilienza cognitiva necessaria alla costanza della prestazione sportiva (Cheng et al., 2024; Tosti et al., 2024).

La distinzione tra l'efficacia del biofeedback e del neurofeedback si può riflettere in un parallelismo anche nell'ambito del recupero da infortunio. Nello specifico, nella riabilitazione il biofeedback è fondamentale per gestire lo stress psicofisiologico derivante dall'infortunio (Rollo et al., 2017), mentre il neurofeedback può intervenire sulla componente neurocognitiva, agendo direttamente sulla riorganizzazione delle mappe motorie e sul ripristino dei pattern neuromuscolari alterati dall'infortunio stesso o dalla prolungata inattività (Conder & Conder, 2014).

La criticità maggiormente riportata in letteratura riguardo al neurofeedback è la mancanza di protocolli standardizzati che possano garantire l'efficacia dello strumento utilizzato (Ros et al., 2020). L'obiettivo principale del lavoro di Ros e colleghi (2020) è fornire una guida standardizzata, chiamata *CRED-nf checklist*, per incrementare la qualità metodologica degli studi sul neurofeedback. Gli autori specificano che i partecipanti al neurofeedback possono trarre beneficio da una pluralità di meccanismi, superando la visione che limita l'efficacia di questo strumento al solo processo neurofisiologico derivante dal training di uno specifico pattern cerebrale. Infatti, durante il training intervengono anche i fattori non specifici propri dell'ambiente del neurofeedback, come l'interazione tra il trainer e il partecipante, e i fattori comuni a diversi tipi di intervento, come i vantaggi derivanti dall'impegno in una forma di allenamento cognitivo, oltre ai meccanismi psicosociali e all'effetto placebo. Inoltre, nei

risultati del neurofeedback convergerebbero anche gli effetti legati alla ripetizione e gli effetti naturali, i quali possono essere positivi come lo sviluppo cognitivo nell'infanzia o negativi come il declino cognitivo in età avanzata.

Tali meccanismi potrebbero interagire sinergicamente creando un effetto complessivo maggiore o, al contrario, in modo antagonistico riducendo il beneficio totale; ancora, potrebbero combinarsi in modo additivo (Rothman, 1974). I ricercatori dovrebbero quindi discriminare i contributi di ciascun meccanismo includendo gruppi di controllo, progettando attentamente gli studi e misurando sia l'attività cerebrale sia il comportamento degli individui coinvolti. Tali elementi rientrano nella checklist proposta da Ros e collaboratori: si ritiene essenziale pre-registrare il protocollo, indicando gli outcomes primari e secondari previsti e specificando il numero, la frequenza e la durata delle sessioni di neurofeedback.

Thibault e Raz (2017) sostengono che l'effetto placebo domina i risultati del neurofeedback. A tal proposito, la modalità in doppio-cieco è considerata la via più efficace per isolare i risultati specifici del neurofeedback dai fattori placebo e dalle aspettative del trainer. Tuttavia, pochi software di neurofeedback sono progettati per nascondere il segnale reale al trainer. Per tale motivo, Ros e colleghi (2020) propongono l'uso di disegni sperimentali più rigorosi in cui vi siano gruppi di controllo. In particolare, propongono l'impiego dello *sham*-neurofeedback per il gruppo di controllo, in cui viene fornito un feedback fittizio e non correlato all'attività cerebrale reale del soggetto, al fine di isolare l'effetto placebo e la suggestione derivante dall'ambiente altamente tecnologico. Inoltre, il confronto con gruppi di controllo in cui vengono somministrati trattamenti gold standard, come i protocolli farmacologici già validati, permetterebbe di confrontare l'efficacia del neurofeedback con le opzioni terapeutiche convenzionali.

Le resistenze metodologiche riguardano anche la possibile alterazione dei risultati a causa dei fattori psicosociali e artefatti fisiologici. La *CRED-nf checklist* propone quindi una rendicontazione sistematica delle istruzioni date ai partecipanti e delle strategie mentali impiegate, nonché delle modalità tecniche usate per rimuovere gli artefatti fisiologici, ossia i segnali elettrici non cerebrali come i movimenti oculari o le contrazioni muscolari (Ros et al., 2020).

Inoltre, in risposta ai dubbi della comunità scientifica sulla capacità dei soggetti di autoregolare la propria attività neurale al di fuori del training neurofeedback, Ros e colleghi (2020) propongono l'inclusione dei *transfer runs*, ovvero sessioni prive di feedback in cui il soggetto deve dimostrare un controllo volontario dei propri segnali cerebrali.

Un'altra barriera all'implementazione del biofeedback e del neurofeedback come strumenti di intervento convenzionale è data dagli elevati costi di accesso, derivanti dalla spesa di acquisto e di manutenzione delle apparecchiature necessarie e intensificati dalla necessità di effettuare diverse sessioni di training prima di raggiungere i miglioramenti desiderati (Marzbani et al., 2016).

La revisione sistematica di Tosti e colleghi (2024a) evidenzia le criticità riguardanti l'applicazione del biofeedback e del neurofeedback nel contesto sportivo. Ad esempio, sebbene i benefici di queste tecniche siano stati documentati ampiamente negli sport di precisione, la loro trasferibilità agli sport di squadra o di resistenza rimane un ambito ancora poco esplorato. Un altro limite significativo è costituito dal fatto che la letteratura attuale si basa prevalentemente su campioni numericamente ridotti, con una marcata sottorappresentazione delle atlete donne. Inoltre, la maggior parte delle evidenze deriva da contesti di laboratorio altamente controllati, in cui si fatica a replicare le dinamiche complesse e le pressioni psicologiche tipiche delle situazioni competitive, compromettendo così la validità ecologica dei protocolli. Oltre alle criticità a livello metodologico, Tosti e collaboratori (2024a) sottolineano che l'introduzione del neurofeedback nel contesto sportivo solleva interrogativi di natura etica. Ad esempio, l'elevato costo delle attrezzature e la necessità di personale altamente specializzato creano una barriera all'ingresso, accentuando il divario tra organizzazioni sportive ben finanziate e atleti provenienti da contesti con scarse risorse. Inoltre, gli autori riportano il dibattito circa la classificazione del neurofeedback come forma di doping, sebbene non preveda l'assunzione di sostanze. Ottimizzando i processi cognitivi, il neurofeedback potrebbe però essere paragonabile alle forme tradizionali di allenamento mentale e fisico. Tuttavia, la sua evoluzione e integrazione con altre forme di potenziamento cognitivo, come la stimolazione cerebrale non invasiva, complica il quadro etico: sorgono infatti preoccupazioni riguardo l'equità e la parità di accesso (Blumenstein & Orbach, 2014; Friehs et al., 2022).

Inoltre, i risultati del neurofeedback mostrano una variabilità significativa (Tosti et al., 2024b): esiste infatti una quota rilevante di popolazione, definita *non-responder*, che sembra non trarre beneficio dai training e non riesce quindi a modulare intenzionalmente le frequenze EEG oggetto dell'intervento (Weber et al., 2011). L'inefficacia dei protocolli di neurofeedback in questi soggetti è riconducibile a due categorie di fattori predittivi: psicologici e neurofisiologici. Relativamente al piano psicologico, ad influenzare l'esito del training concorrerebbero le convinzioni del soggetto circa la propria capacità di controllare i dispositivi tecnologici in dotazione influenzerebbero (Witte et al., 2013). Inoltre, le strategie mentali utilizzate avrebbero un ruolo diverso in base agli specifici protocolli: Kober e colleghi (2013) hanno evidenziato come nel protocollo SMR i soggetti che non hanno utilizzato tali strategie a livello conscio ottenevano risultati migliori, mentre nel protocollo focalizzato sulle onde gamma non si osservava tale differenza. Rispetto ai predittori neurofisiologici, l'ampiezza delle onde alfa a riposo rilevata prima del training correla con il successo nell'apprendimento del neurofeedback: la configurazione EEG di base del soggetto è quindi un elemento determinante per l'esito del training (Kotchoubey et al., 1999; Wan et al., 2014; Weber et al., 2011). Anche la natura del feedback incide sull'efficacia del neurofeedback: l'uso di un feedback di tipo sociale, come una faccina sorridente, ha dimostrato di attivare maggiormente la corteccia cingolata anteriore e i circuiti dopaminergici della ricompensa rispetto ai feedback visivi di tipo tradizionale, come le barre grafiche, migliorando quindi la capacità di controllo del soggetto (Mathiak et al., 2015). L'insieme di queste evidenze solleva una criticità: l'efficacia del neurofeedback non può essere considerata intrinseca alla tecnologia stretta, dipendendo strettamente da variabili individuali e procedurali. La necessità di calibrare ogni training sulla base dei fattori precedentemente illustrati complica lo sviluppo di processi standardizzati, limitando di conseguenza la replicabilità dei risultati (Tosti et al., 2024b).

Un'ulteriore criticità rispetto all'impiego del biofeedback e del neurofeedback nello sport è data dal fatto che la maggior parte degli studi in tale ambito abbiano utilizzato i due strumenti separatamente (Rijken et al., 2016): sulla base delle affinità tra i due strumenti, appare plausibile ipotizzare che l'integrazione di biofeedback e neurofeedback nello stesso training possa produrre benefici superiori rispetto al loro impiego isolato (Tosti et al., 2024b).

5.2 Prospettive future

Il biofeedback è uno strumento in continua evoluzione: l'introduzione di protocolli integrati con la realtà virtuale offre infatti nuove prospettive per il futuro (Kothgassner et al., 2022). Ad esempio, sono stati introdotti protocolli con visualizzazione in realtà virtuale di un ambiente naturale, finalizzati al rilassamento e alla riduzione dello stress (Knaust et al., 2022). La letteratura suggerisce che l'integrazione della realtà virtuale con il biofeedback possa rappresentare una svolta metodologica, soprattutto nei training con le fasce di popolazioni più giovani (Kothgassner et al., 2022). Gli adolescenti, infatti, presentano spesso difficoltà maggiori rispetto agli adulti nel mantenere la motivazione e l'orientamento all'obiettivo nel corso del trattamento (Fadhli et al., 2020). La *gamification* può aumentare la motivazione e la concentrazione e l'uso di apparecchiature immersive, come i visori per la realtà virtuale, possono ridurre le distrazioni e aumentare il coinvolgimento nel training (Kothgassner et al., 2022), diminuendo quindi la difficoltà di aderenza al trattamento negli individui più giovani (Fadhli et al., 2020). Sebbene le ricerche in letteratura siano ancora scarse (Kothgassner & Felnhöfer, 2021), i risultati dati dall'integrazione del biofeedback con elementi di *gamification* e realtà virtuale sembrano essere promettenti (Bossenbroek et al., 2020; Knox et al., 2011; Van Rooij et al., 2016). Sono quindi necessarie ulteriori ricerche, condotte in modo rigoroso e standardizzato, su tali protocolli di biofeedback integrato (Kothgassner et al., 2022).

Oltre all'aderenza al trattamento, la realtà virtuale apre la strada ad una maggiore validità ecologica dei training: i protocolli integrati permettono di simulare scenari complessi ad alta pressione, come una competizione sportiva (Cariati et al., 2025). Come evidenziato da Cotterill (2018), la realtà virtuale può essere utilizzata in ambito sportivo per l'allenamento della strategia, della tattica e dei processi decisionali. Inoltre, il training in realtà virtuale può consentire all'atleta di incrementare la propria esperienza e abilità di gioco senza correre il rischio del sovrallenamento o dell'infortunio (Belch et al., 2017).

L'integrazione della realtà virtuale nei protocolli tradizionali è promettente anche nel contesto riabilitativo: gli ambienti di riabilitazione in realtà virtuale sembrerebbero essere più motivanti rispetto alla riabilitazione convenzionale, riuscendo a mantenere il coinvolgimento dell'individuo grazie al contesto maggiormente interattivo (Levin et al.,

2015). Inoltre, lo sviluppo tecnologico ha portato alla creazione di nuove attrezzature all'avanguardia, come visori wireless di alta qualità e tute aptiche (finalizzate alla trasformazione del dato biometrico in una sensazione fisica immediata), offrendo la possibilità di simulare ambienti sportivi più realistici dal punto di vista percettivo, con un aumento del potenziale di impiego di protocolli integrati sugli atleti (Cotterill, 2018). È quindi necessario che la ricerca futura si orienti verso la conduzione di studi controllati e randomizzati: come evidenziato da Cotterill (2018), la sfida principale è fornire sempre più prove empiriche che confermino la capacità degli ambienti virtuali di evocare risposte fisiologiche e psicologiche sovrapponibili a quelle che vengono suscitate nell'ambiente sportivo reale.

Sul piano metodologico, è fondamentale che le future ricerche adottino un approccio più rigoroso per garantire la generalizzabilità dei risultati. Questo si traduce nella progettazione di studi standardizzati su larga scala che colmino le carenze attualmente presenti in letteratura ed evidenziate da Tosti e collaboratori (2024a), quindi coinvolgendo maggiormente le atlete donne e in generale gli atleti delle discipline di squadra e di resistenza. La standardizzazione dei protocolli di neurofeedback dovrebbe avvenire seguendo le linee guida della *CRED-nf checklist* (Ros et al., 2020), la quale garantisce la trasparenza metodologica, la replicabilità degli studi e la distinzione tra gli effetti neurofisiologici specifici del training e i benefici derivanti da altri elementi, come il setting o aspetti psicosociali. Invece, nel campo del biofeedback non si è ancora giunti ad una checklist altrettanto strutturata: la valutazione della qualità dei protocolli di biofeedback si basa ancora prevalentemente sui criteri di efficacia stabiliti dall'*Association of Applied Psychophysiology and Biofeedback* (Yucha & Montgomery, 2008), i quali però si focalizzano maggiormente sull'esito terapeutico che sulla standardizzazione dei protocolli. Si sottolinea quindi l'urgenza di colmare queste carenze metodologiche, suggerendo la necessità di aderire a norme tecniche condivise per garantire la comparabilità dei risultati e la generalizzazione degli stessi.

Parallelamente al rigore metodologico, vi è anche la risoluzione del dilemma etico riguardante l'accessibilità a queste strumentazioni (Tosti et al., 2024a). Come evidenziato da Düking e collaboratori (2017), l'uso di dispositivi portatili a basso costo collegati ad applicazioni *mobile* sarebbe un buon inizio per abbattere le barriere economiche che attualmente limitano le tecniche di feedback psicofisiologico ai soli

contesti d'élite. Secondo gli autori, tali dispositivi potrebbero aiutare anche gli atleti principianti ad ottimizzare le sessioni di allenamento e il loro stato di salute, concorrendo a prevenire il sovraccarico e gli infortuni.

Un altro dilemma etico riguarda l'eventuale classificazione del neurofeedback come forma di doping: la ricerca futura e gli organismi di regolamentazione, come la *World Anti-Doping Agency*, dovranno intervenire su tale nodo etico e regolamentare l'uso di questi protocolli al fine di discriminare le pratiche di allenamento mentale legittime dai vantaggi competitivi scorretti (Tosti et al., 2024a).

In conclusione, il biofeedback e il neurofeedback sono strumenti con un grande potenziale per la prestazione sportiva e il recupero da infortunio (Conder & Conder, 2015; Gong et al., 2021; Jimenez Morgan & Molina Mora, 2017; Levy & Baldwin, 2019; Tosti et al., 2024a; Xiang et al., 2018; Yu et al., 2025) ed è quindi necessario che la ricerca futura metta al centro il rigore metodologico, promuovendo l'adozione di protocolli standardizzati ma flessibili nella personalizzazione individuale (Ros et al., 2020). È inoltre necessario focalizzarsi sull'etica di accesso e uso, garantendo una maggiore fruibilità delle tecniche di biofeedback e neurofeedback attraverso dispositivi portatili a basso costo (Düking et al., 2017) e definendo parametri normativi che assicurino la correttezza dei protocolli usati (Tosti et al., 2024a).

Inoltre, è fondamentale evidenziare che i training di biofeedback e neurofeedback dovrebbero essere considerati parte integrante di un protocollo d'intervento multimodale e non come strumenti isolati: è stato dimostrato che l'efficacia di queste tecniche sulle prestazioni degli atleti è potenziata quando vengono combinate con altre strategie, come l'imagery e il self-talk (Blumenstein & Orbach, 2014; Gruzelier, 2014). Tosti e colleghi (2024b) sottolineano infatti la necessità di condurre studi per approfondire in ambito sportivo i benefici derivanti dall'integrazione di biofeedback e neurofeedback in un unico training, ipotizzando che un approccio di questo tipo possa condurre a risultati migliori rispetto all'impiego isolato di una singola tecnica. Tale training integrato potrebbe permettere all'atleta di accedere in modo più rapido e duraturo allo stato di *flow* (Jackson & Csikszentmihalyi, 1999), riuscendo a sincronizzare la calma periferica con l'efficienza cognitiva (Blumenstein & Orbach, 2014). Jackson e Csikszentmihalyi (1999) definiscono il *flow* come uno stato di

completa immersione nel compito, consentendo all'atleta di compiere un'attività in modo automatico senza percepire lo sforzo ad essa associato.

Infine, nel contesto riabilitativo, è stato evidenziato che l'integrazione del biofeedback con i programmi fisioterapici tradizionali può ridurre i tempi di recupero (Giggins et al., 2013). L'infortunio, infatti, non è unicamente un deficit strutturale, ma coinvolge anche la sfera psicologica ed emotiva dell'atleta: il recupero non può quindi limitarsi alla sola dimensione biologica e dovrebbe integrare altri aspetti, come la gestione dello stress emotivo e la regolazione della motivazione dell'atleta (Brewer & Redmond, 2017). In tali aspetti può intervenire il biofeedback, il quale può agire direttamente anche sulla guarigione strutturale intervenendo a livello neuromuscolare (Giggins et al., 2013). I programmi riabilitativi dovrebbero quindi orientarsi sempre di più ad un approccio biopsicosociale, capace di intervenire per il recupero sia fisico sia mentale (Brewer & Redmond, 2017).

CONCLUSIONI

Dall'analisi della letteratura condotta nella presente tesi emerge l'efficacia del ruolo dell'autoregolazione psicofisiologica in ambito sportivo, confermando il potenziale dei protocolli di biofeedback e neurofeedback nell'ottimizzazione della performance e nel recupero da infortunio.

Rispetto all'ottimizzazione della performance, l'evidenza scientifica raccolta conferma che il biofeedback agisce efficacemente sulla modulazione dei parametri periferici (Jimenez Morgan & Molina Mora, 2017), permettendo all'atleta una gestione dell'arousal (Lehrer et al., 2020; Blumenstein & Orbach, 2014) e dell'ansia derivante dalla competizione (Paul & Garg, 2012). Inoltre, la capacità di ridurre le co-contrazioni inefficaci (De Luca, 1997), l'affaticamento muscolare (Merletti & Farina, 2016; Giggins et al., 2013; Dos Anjos et al., 2024) e la percezione dello sforzo (Lehrer et al., 2003; Brown & Bray, 2019) si traduce in un affinamento del gesto tecnico e in un recupero post-sforzo più rapido (Perez-Gaido et al., 2021).

L'impiego del neurofeedback nell'ottimizzazione della performance ha spostato invece il focus sui processi centrali, dimostrando come l'intervento diretto sui processi neurofisiologici possa potenziare in particolare le funzioni cognitive critiche in ambito sportivo, quali i tempi di reazione (De Brito et al., 2022; Mikicin et al., 2015; Parsaee et al., 2018) e l'attenzione sostenuta (Liu et al., 2017; Cheng et al., 2015).

Un elemento chiave emerso dall'analisi della letteratura riguarda la trasferibilità delle abilità acquisite al di fuori dei training effettuati in laboratorio: la sfida principale per ogni atleta è infatti la capacità di mantenere tali competenze di autoregolazione durante la competizione, caratterizzata dal carico fisico e dalla pressione psicologica. Al fine di colmare questo divario tra il setting controllato del laboratorio e la complessità del contesto agonistico, emerge la necessità di implementare e promuovere l'impiego dei *wearable devices* nella routine dell'atleta. Infatti, l'adozione integrata di training effettuati in laboratorio e l'uso di tali dispositivi portatili durante l'allenamento quotidiano e le fasi pre-gara emerge come una soluzione ottimale per rendere l'atleta autonomo nel controllo dell'arousal, nel mantenimento della concentrazione e nel potenziamento della resilienza allo stress (Giraldo-Pedroza et al., 2020; Jimenez Morgan & Molina Mora, 2017; Kos et al., 2019). Tale integrazione può essere un

fondamentale cambio di paradigma nel mental training agonistico: l'uso sistematico dei *wearable devices* può favorire l'internalizzazione delle strategie di autoregolazione, affinando la consapevolezza interocettiva dell'atleta. Si promuove così il passaggio da una modulazione mediata dallo strumento ad una padronanza autonoma, grazie alla quale l'atleta può richiamare lo stato psicofisico ottimale anche in assenza del feedback.

In ambito riabilitativo, dall'analisi della letteratura si può dedurre che l'impiego del biofeedback e del neurofeedback risulta coerente con i presupposti del modello biopsicosociale (Brewer & Redmond, 2017; Wiese-Bjornstal et al., 1998). Tali strumenti si sono rivelati infatti efficaci non solo per il ripristino della sincronizzazione neuromuscolare alterata dall'infortunio (Campanini et al., 2020; Ananías et al., 2024; Morales-Sánchez et al., 2022; Hernández-Mendo, 2011; Hernández-Mendo & Morales-Sánchez, 2014), ma anche per il superamento di barriere psicologiche, quali la catastrofizzazione del dolore e la kinesiophobia (Rollo et al., 2017). Data la natura multidimensionale del recupero da infortunio, emerge la necessità di promuovere una maggiore sinergia operativa interdisciplinare che veda il biofeedback come uno strumento trasversale alle diverse figure professionali coinvolte nella riabilitazione dell'atleta. Nello specifico, se il fisioterapista può impiegare il biofeedback per monitorare in tempo reale l'attivazione muscolare e favorire la modulazione dei sintomi algici (Giggins et al., 2013), lo psicologo dello sport può intervenire sulla componente psicofisiologica degli stati emotivi disfunzionali legati all'infortunio (Rollo et al., 2017). Solo attraverso il dialogo professionale e l'applicazione trasversale di tale strumento è possibile trasformare la riabilitazione in un processo veramente attivo e consapevole, in cui l'atleta possa riacquisire non solo la funzionalità fisica ma anche la fiducia nelle prassi riabilitative e il controllo sui propri stati psicologici ed emotivi.

Tuttavia, il pieno consolidamento del biofeedback e del neurofeedback in ambito sportivo non può prescindere dal superamento di alcune criticità metodologiche ed etiche. Come evidenziato nel corso della trattazione, fattori come l'eterogeneità dei protocolli e gli elevati costi delle strumentazioni costituiscono delle barriere significative per la diffusione del biofeedback e del neurofeedback (Tosti et al., 2024a, 2024b). La sfida futura è quindi la standardizzazione delle procedure, sostenuta da un ampliamento della produzione scientifica a riguardo. Risulta infatti necessario incrementare il numero di studi controllati e randomizzati che coinvolgano campioni più

vasti e diversificati, colmando l'attuale sottorappresentazione delle atlete donne e approfondendo l'efficacia dei protocolli negli atleti di sport di squadra e di resistenza (Tosti et al., 2024a). È inoltre necessario che la ricerca non si limiti alla misurazione degli effetti immediati, ma includa studi longitudinali che possano valutare la persistenza dei benefici nel tempo. Solo attraverso una base di evidenze più solide e standardizzate sarà possibile accrescere la fiducia della comunità sportiva verso il biofeedback e il neurofeedback, superando le attuali resistenze dovute alla limitata conoscenza di tali strumenti, e promuovere la loro implementazione nei programmi di allenamento e riabilitazione.

Oltre agli aspetti metodologici, è necessario affrontare anche le implicazioni etiche legate all'accessibilità del biofeedback e del neurofeedback, attualmente strumenti ad appannaggio quasi esclusivo dei contesti d'élite e delle società sportive con ingenti risorse finanziarie (Düking et al., 2017). Il futuro dovrebbe quindi orientarsi verso la democratizzazione di tali strumenti promuovendo l'uso delle strumentazioni con un costo maggiormente accessibile, come i *wearable devices*, anche nelle categorie giovanili e dilettantistiche. Affinché tale transizione si realizzi, è necessario un intervento attivo da parte delle istituzioni governative e delle federazioni sportive, attraverso lo stanziamento di fondi mirati e la promozione di programmi di formazione specifica. Solo un impegno coordinato tra le istituzioni governative e le federazioni sportive può garantire che le potenzialità del biofeedback e del neurofeedback siano al servizio della performance e della salute di un numero più ampio di atleti, indipendentemente dal livello della pratica agonistica, trasformando l'innovazione tecnologica da un vantaggio d'élite ad una risorsa condivisa per l'intero sistema sportivo.

In quest'ottica, la promozione della diffusione del biofeedback e del neurofeedback in ambito sportivo si allinea perfettamente con i valori olimpici: promuovere un accesso equo alle tecnologie di autoregolazione significa infatti rispettare il principio di uguaglianza delle opportunità, garantendo che ogni atleta possa superare i propri limiti e potenziare le proprie capacità. In tal senso, l'integrazione di tali strumenti riflette la visione di uno sport che pone al centro l'essere umano nella sua totalità e dove l'eccellenza non è solo il risultato di una dotazione tecnica, ma deriva anche dalla profonda conoscenza di sé e dalla capacità di autoregolare i propri stati psicofisiologici.

Bibliografia

- Abbas, Z. A., & North, J. S. (2018). Good-vs. poor-trial feedback in motor learning: the role of self-efficacy and intrinsic motivation across levels of task difficulty. *Learning and Instruction*, 55, 105-112. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1016/j.learninstruc.2017.09.009>
- Abbiss, C. R., Peiffer, J. J., Meeusen, R., & Skorski, S. (2015). Role of ratings of perceived exertion during self-paced exercise: What are we actually measuring? *Sports Medicine*, 45, 1235–1243. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0344-5>
- *Adrian, E. D., & Matthews, B. H. (1934). The Berger rhythm: potential changes from the occipital lobes in man. *Brain*, 57(4), 355-385. <https://doi.org/10.1093/brain/awp324>
- Ahmadnezhad, L., Yalfani, A., & Gholami Borujeni, B. (2020). Inspiratory Muscle Training in Rehabilitation of Low Back Pain: A Randomized Controlled Trial. *Journal of sport rehabilitation*, 29(8), 1151–1158. <https://doi.org/10.1123/jsr.2019-0231>
- Alahakone, A. U., & Senanayake, A. (2010). A real-time interactive biofeedback system for sports training and rehabilitation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 224(3), 181–190. <https://doi.org/10.1243/17543371JSET52>
- Ananías, J., Vidal, C., Ortiz-Muñoz, L., Irrázaval, S., & Besa, P. (2024). Use of electromyographic biofeedback in rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis. *Physiotherapy*, 123, 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.physio.2023.12.005>
- Andersen, M. B., & Williams, J. M. (1988). A model of stress and athletic injury: Prediction and prevention. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 10(3), 294–306.
- Angelakis, E., Stathopoulou, S., Frymiare, J. L., Green, D. L., Lubar, J. F., & Kounios, J. (2007). EEG neurofeedback: A brief overview and an example of peak alpha frequency training for cognitive enhancement in the elderly. *The Clinical Neuropsychologist*, 21(1), 110–129. <https://doi.org/10.1080/13854040600744839>
- Anil, K., Demain, S., Burridge, J., Simpson, D., Taylor, J., Cotter, I., & Vuckovic, A. (2022). The importance of self-efficacy and negative affect for neurofeedback success for central neuropathic pain after a spinal cord injury. *Scientific reports*, 12(1), 10949. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15213-7>
- Araújo, D., Hristovski, R., Seifert, L., Carvalho, J., & Davids, K. (2019). Ecological cognition: Expert decision-making behaviour in sport. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 12(1), 1–25. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2017.1349826>
- Ardern, C. L., Taylor, N. F., Feller, J. A., & Webster, K. E. (2014). Fifty-five per cent return to competitive sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: An updated systematic review and meta-analysis including aspects of physical functioning

- and contextual factors. *British Journal of Sports Medicine*, 48, 1543–1552. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-093398>
- Ardern, C. L., Taylor, N. F., Feller, J. A., & Webster, K. E. (2013a). A systematic review of the psychological factors associated with returning to sport following injury. *British Journal of Sports Medicine*, 47(17), 1120–1126. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091203>
- Ardern, C. L., Taylor, N. F., Feller, J. A., Whitehead, T. S., & Webster, K. E. (2013b). Psychological responses matter in returning to preinjury level of sport after anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *The American journal of sports medicine*, 41(7), 1549–1558. <https://doi.org/10.1177/0363546513489284>
- Ardern, C. L., Taylor, N. F., Feller, J. A., Whitehead, T. S., & Webster, K. E. (2015). Sports participation 2 years after anterior cruciate ligament reconstruction in athletes who had not returned to sport at 1 year: a prospective follow-up of physical function and psychological factors in 122 athletes. *The American journal of sports medicine*, 43(4), 848–856. <https://doi.org/10.1177/0363546514563282>
- Argent, R., Slevin, P., Bevilacqua, A., Neligan, M., Daly, A., & Caulfield, B. (2019). Wearable Sensor-Based Exercise Biofeedback for Orthopaedic Rehabilitation: A Mixed Methods User Evaluation of a Prototype System. *Sensors*, 19(2), 432. <https://doi.org/10.3390/s19020432>
- Arns, M., De Ridder, S., Strehl, U., Breteler, M., & Coenen, A. (2009). Efficacy of neurofeedback treatment in ADHD: the effects on inattention, impulsivity and hyperactivity: a meta-analysis. *Clinical EEG and neuroscience*, 40(3), 180–189. <https://doi.org/10.1177/155005940904000311>
- Arvinen-Barrow, M., & Clement, D. (Eds.). (2024). *The psychology of sport injury and rehabilitation* (2nd ed.). Routledge.
- Atkinson, R. L., Hilgard, E. R., & Nolen-Hoeksema, S. (2017). *Introduzione alla psicologia* (S. Nolen-Hoeksema, Ed.; C. Mirandola, Trans.). Piccin Nuova Libreria.
- Azuma, K., Adachi, Y., Hayashi, H., & Kubo, K. Y. (2015). Chronic psychological stress as a risk factor of osteoporosis. *Journal of UOEH*, 37(4), 245–253.
- Bailey, R. (2006). Physical education and sport in schools: A review of benefits and outcomes. *Journal of School Health*, 76(8), 397–401. <https://doi.org/10.1111/j.1746-1561.2006.00132.x>
- Barr, W. B., Pritchep, L. S., Chabot, R., Powell, M. R., & McCrea, M. (2012). Measuring brain electrical activity to track recovery from sport-related concussion. *Brain injury*, 26(1), 58–66. <https://doi.org/10.3109/02699052.2011.608216>
- Barrett, L. F. (2017). The theory of constructed emotion: an active inference account of interoception and categorization. *Social cognitive and affective neuroscience*, 12(1), 1–23. <https://doi.org/10.1093/scan/nsw154>

- Barsade, S. G. (2002). The ripple effect: Emotional contagion and its influence on group behavior. *Administrative Science Quarterly*, 47(4), 644-675. <https://doi.org/10.2307/3094912>
- Baumeister R. F. (1984). Choking under pressure: self-consciousness and paradoxical effects of incentives on skillful performance. *Journal of personality and social psychology*, 46(3), 610–620. <https://doi.org/10.1037//0022-3514.46.3.610>
- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2021). *Neuroscience: Exploring the Brain* (4th ed.). Wolters Kluwer.
- Beauchamp, M. K., Harvey, R., & Beauchamp, P. (2012). An integrated biofeedback and psychological skills training program for Canada's Olympic short-track speedskating team. *Journal of Clinical Sport Psychology*, 6(1), 67–84. <https://doi.org/10.1123/jcsp.6.1.67>
- Beckmann, J., & Elbe, A. (2015). *Sport psychological interventions in competitive sports*. Cambridge Scholars Publishing.
- *Belch, D., Bailenson, J., Karutz, C., Miyanochara, M., Clancy, C., Sarchet, J., & Sevilla, J. (2017). *U.S. Patent No. 20,170,039,881*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Bellavance, M. A., & Rivest, S. (2014). The HPA–immune axis and the immunomodulatory actions of glucocorticoids in the brain. *Frontiers in immunology*, 5, 136.
- Bergbom, S., Boersma, K., Overmeer, T., & Linton, S. J. (2011). Relationship among pain catastrophizing, depressed mood, and outcomes across physical therapy treatments. *Physical therapy*, 91(5), 754–764. <https://doi.org/10.2522/ptj.20100136>
- *Berger, H. (1929). Über das elektroenkephalogramm des menschen. *Archiv für psychiatrie und nervenkrankheiten*, 87(1), 527-570.
- Berntson, G. G., Thomas Bigger Jr, J., Eckberg, D. L., Grossman, P., Kaufmann, P. G., Malik, M., ... & Van Der Molen, M. W. (1997). Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*, 34(6), 623-648. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1997.tb02140.x>
- Birbaumer, N., Elbert, T., Canavan, A. G., & Rockstroh, B. (1990). Slow potentials of the cerebral cortex and behavior. *Physiological Reviews*, 70(1), 1–41. <https://doi.org/10.1152/physrev.1990.70.1.1>
- Blumenstein, B., & Hung, E. T. M. (2016). Biofeedback in sport. In *Routledge international handbook of sport psychology* (pp. 429-438). Routledge.
- Blumenstein, B., & Orbach, I. (2014). Biofeedback for sport and performance enhancement. In *Oxford Handbook Topics in Psychology* (online ed.). Oxford Academic. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199935291.013.001>

- Blumenstein, B., Bar-Eli, M., & Tenenbaum, G. (1997). A five-step approach to mental training incorporating biofeedback. *The Sport Psychologist*, 11(4), 440–453. <https://doi.org/10.1123/tsp.11.4.440>
- Blumenstein, B., Bar-Eli, M., & Tenenbaum, G. (2002). *Brain and body in sport and exercise: Biofeedback applications in performance enhancement*. Wiley.
- Boecker, H., Sprenger, T., Spilker, M. E., Henriksen, G., Koppenhoefer, M., Wagner, K. J., ... & Tolle, T. R. (2008). The runner's high: opioidergic mechanisms in the human brain. *Cerebral cortex*, 18(11), 2523–2531.
- Boro, N., Patil, P. S., Sukladas, R., Balo, A., Baruah, M., & Hlychho, M. (2025). The effect of breath-control biofeedback training on endurance and anxiety in adolescent runners. *International Journal of Physiology, Exercise and Physical Education*, 7(2), 105–107. <https://doi.org/10.33545/26647249.2025.v7.i2b.204>
- Bose, M., Oliván, B., & Laferrère, B. (2009). Stress and obesity: the role of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis in metabolic disease. *Current opinion in endocrinology, diabetes, and obesity*, 16(5), 340–346. <https://doi.org/10.1097/MED.0b013e32832fa137>
- Bossenbroek, R., Wols, A., Weerdmeester, J., Lichtwarck-Aschoff, A., Granic, I., & van Rooij, M. M. J. W. (2020). Efficacy of a Virtual Reality Biofeedback Game (DEEP) to Reduce Anxiety and Disruptive Classroom Behavior: Single-Case Study. *JMIR mental health*, 7(3), e16066. <https://doi.org/10.2196/16066>
- Bowman, T., Gervasoni, E., Arienti, C., Lazzarini, S. G., Negrini, S., Crea, S., ... & Carrozza, M. C. (2021). Wearable devices for biofeedback rehabilitation: a systematic review and meta-analysis to design application rules and estimate the effectiveness on balance and gait outcomes in neurological diseases. *Sensors*, 21(10), 3444. <https://doi.org/10.3390/s21103444>
- Bresnahan, S. M., & Barry, R. J. (2002). Specificity of quantitative EEG analysis in adults with attention deficit hyperactivity disorder. *Psychiatry Research*, 112, 133–144. [https://doi.org/10.1016/S0165-1781\(02\)00190-7](https://doi.org/10.1016/S0165-1781(02)00190-7)
- Brewer, B. W., & Chatterton, H. A. (2024). Athletic Identity and Sport Injury Processes and Outcomes in Young Athletes: A Supplemental Narrative Review. *Journal of functional morphology and kinesiology*, 9(4), 191. <https://doi.org/10.3390/jfmk9040191>
- Brewer, B. W., & Redmond, C. (2016). *Psychology of sport injury*. Human Kinetics.
- Brewer, B. W., Van Raalte, J. L., Cornelius, A. E., Petitpas, A. J., Sklar, J. H., Pohlman, M. H., Krushell, R. J., & Ditmar, T. D. (2000). Psychological factors, rehabilitation adherence, and rehabilitation outcome after anterior cruciate ligament reconstruction. *Rehabilitation Psychology*, 45(1), 20–37. <https://doi.org/10.1037/0090-5550.45.1.20>

- Brown, D. M. Y., & Bray, S. R. (2019). Heart rate biofeedback attenuates effects of mental fatigue on exercise performance. *Psychology of Sport and Exercise*, 41, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2018.12.001>
- Browne, J. D., Boland, D. M., Baum, J. T., Ikemiya, K., Harris, Q., Phillips, M., Neufeld, E. V., Gomez, D., Goldman, P., & Dolezal, B. A. (2021). Lifestyle modification using a wearable biometric ring and guided feedback improve sleep and exercise behaviors: A 12-month randomized, placebo-controlled study. *Frontiers in Physiology*, 12, 777874. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.777874>
- Brugnoli, M. P. (2005). *Tecniche di mental training nello sport: Vincere la tensione, aumentare la concentrazione e la performance agonistica*. Red Edizioni.
- Buccelletti, E., Gilardi, E., Scaini, E., Galiuto, L., Persiani, R., Biondi, A., Basile, F., & Silveri, N. G. (2009). Heart rate variability and myocardial infarction: systematic literature review and metanalysis. *European review for medical and pharmacological sciences*, 13(4), 299–307.
- *Budzynski, T. H., & Stoyva, J. M. (1969). An instrument for producing deep muscle relaxation by means of analog information feedback 1. *Journal of Applied Behavior Analysis*, 2(4), 231-237.
- Busch, V., Magerl, W., Kern, U., Haas, J., Hajak, G., & Eichhammer, P. (2012). The effect of deep and slow breathing on pain perception, autonomic activity, and mood processing--an experimental study. *Pain medicine*, 13(2), 215–228. <https://doi.org/10.1111/j.1526-4637.2011.01243.x>
- Buzsáki, G. (2006). *Rhythms of the Brain*. Oxford university press.
- Cacioppo, J. T., Tassinary, L. G., & Berntson, G. (Eds.). (2012). *Handbook of Psychophysiology*. Cambridge University Press.
- Cahill, L., & McGaugh, J. L. (1995). A novel demonstration of enhanced memory associated with emotional arousal. *Consciousness and Cognition: An International Journal*, 4(4), 410-421. <https://doi.org/10.1006/ccog.1995.1048>
- Cahill, L., & McGaugh, J. L. (1998). Mechanisms of emotional arousal and lasting declarative memory. *Trends in neurosciences*, 21(7), 249-299. [https://doi.org/10.1016/s0166-2236\(97\)01214-9](https://doi.org/10.1016/s0166-2236(97)01214-9)
- Campanini, I., Disselhorst-Klug, C., Rymer, W. Z., & Merletti, R. (2020). Surface EMG in clinical assessment and neurorehabilitation: barriers limiting its use. *Frontiers in neurology*, 11, 934. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00934>
- Campo, M., Laborde, S., & Mosley, E. (2016). Emotional intelligence training in team sports: The influence of a season long intervention program on trait emotional intelligence. *European Journal of Sport Science*. <https://doi.org/10.1027/1614-0001/a000201>

- *Cannon, W. B. (1927). The James-Lange theory of emotions: a critical examination and an alternative theory. *The American Journal of Psychology*, 39, 106-124. <https://doi.org/10.2307/1415404>
- *Cannon, W. B., & Bard, P. (1927). The interrelations of emotions: Bodily changes and emotions. In W. B. Cannon (Ed.), *Bodily changes in pain, hunger, fear, and rage* (pp. 243-270). Appleton.
- *Caporale, N., & Dan, Y. (2008). Spike timing-dependent plasticity: a Hebbian learning rule. *Annu. Rev. Neurosci.*, 31(1), 25-46. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.31.060407.125639>
- Cariati, I., Bonanni, R., Cifelli, P., D'Arcangelo, G., Padua, E., Annino, G., & Tancredi, V. (2025). Virtual reality and sports performance: A systematic review of randomized controlled trials exploring balance. *Frontiers in Sports and Active Living*, 7, 1497161. <https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1497161>
- Carroll, L. J., Cassidy, J. D., Peloso, P. M., Borg, J., von Holst, H., Holm, L., Paniak, C., & Pépin, M. (2004). Prognosis for mild traumatic brain injury: Results of the WHO Collaborating Centre Task Force on Mild Traumatic Brain Injury. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 43(Suppl. 43), 84-105. <https://doi.org/10.1080/16501960410023859>
- Carron, A. V., Bray, S. R., & Eys, M. A. (2002). Team cohesion and team success in sport. *Journal of Sports Sciences*, 20(2), 119-126. <https://doi.org/10.1080/026404102317200828>
- Carron, A. V., Colman, M. M., Wheeler, J., & Stevens, D. (2002). Cohesion and performance in sport: a meta analysis. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 24(2), 168-188. <https://doi.org/10.1123/jsep.24.2.168>
- Carter, H. (2024). Mental toughness and resilience in elite athletes. *Frontiers in Multidisciplinary Research*, 5(2), 8-10.
- Casellato, C., Pedrocchi, A., Zorzi, G., Vernisse, L., Ferrigno, G., & Nardocci, N. (2012). EMG-based visual-haptic biofeedback: a tool to improve motor control in children with primary dystonia. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 21(3), 474-480.
- Cavanagh, J. F., & Frank, M. J. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in cognitive sciences*, 18(8), 414-421. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.04.012>
- *Caycedo, A. (1964). Sophrology and Psychosomatic Medicine. *American Journal of Clinical Hypnosis*, 7(2), 103-106. <https://doi.org/10.1080/00029157.1964.10402403>
- Cei, A. (2011). *L'allenamento mentale degli atleti*. In F. Lucidi (Ed.), *SportivaMente: Temi di psicologia dello sport* (pp. 339-364). LED Edizioni Universitarie.
- Cerin, E. (2003). Anxiety versus Fundamental Emotions as Predictors of Perceived Functionality of Pre-Competitive Emotional States, Threat, and Challenge in Individual

- Sports. *Journal of Applied Sport Psychology*, 15(3), 223–238. <https://doi.org/10.1080/10413200305389>
- Chen, T. T., Wang, K. P., Cheng, M. Y., Chang, Y. T., Huang, C. J., & Hung, T. M. (2019). Impact of emotional and motivational regulation on putting performance: a frontal alpha asymmetry study. *PeerJ*, 7, e6777. <https://doi.org/10.7717/peerj.6777>
- Chen, J.-L., Yeh, D.-P., Lee, J.-P., Chen, C.-Y., Huang, C.-Y., Lee, S.-D., Chen, C.-C., Kuo, T. B. J., Kao, C.-L., & Kuo, C.-H. (2011). Parasympathetic nervous activity mirrors recovery status in weightlifting performance after training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(6), 1546–1552. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181da7858>
- Cheng, M. Y., Huang, C. J., Chang, Y. K., Koester, D., Schack, T., & Hung, T. M. (2015). Sensorimotor Rhythm Neurofeedback Enhances Golf Putting Performance. *Journal of sport & exercise psychology*, 37(6), 626–636. <https://doi.org/10.1123/jsep.2015-0166>
- Cheng, M. Y., Yu, C. L., An, X., Wang, L., Tsai, C. L., Qi, F., & Wang, K. P. (2024). Evaluating EEG neurofeedback in sport psychology: a systematic review of RCT studies for insights into mechanisms and performance improvement. *Frontiers in psychology*, 15, 1331997. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1331997>
- Choi, K. Y., & Ishii, H. (2020). ambienBeat: Wrist-worn mobile tactile biofeedback for heart rate rhythmic regulation. In *Proceedings of the fourteenth international conference on tangible, embedded, and embodied interaction* (pp. 17-30). <https://doi.org/10.1145/3374920.3374938>
- Christiansen, H., Reh, V., Schmidt, M. H., & Rief, W. (2014). Slow cortical potential neurofeedback and self-management training in outpatient care for children with ADHD: Study protocol and first preliminary results of a randomized controlled trial. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 943. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00943>
- Chung, A. H., Gevirtz, R. N., Gharbo, R. S., Thiam, M. A., & Ginsberg, J. P. (2021). Pilot study on reducing symptoms of anxiety with a heart rate variability biofeedback wearable and remote stress management coach. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 46(4), 347–358. <https://doi.org/10.1007/s10484-021-09519-x>
- Collura T. F. (2013). *Technical Foundations of Neurofeedback*. Routledge.
- Conder, R., & Conder, A. A. (2015). Neuropsychological and psychological rehabilitation interventions in refractory sport-related post-concussive syndrome. *Brain Injury*, 29(2), 249-262. <https://doi.org/10.3109/02699052.2014.965209>
- Cook, I. A., O'Hara, R., Uijtdehaage, S. H. J., Mandelkern, M., & Leuchter, A. F. (1998). Assessing the accuracy of topographic EEG mapping for determining local brain function. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 107(6), 408–414. [https://doi.org/10.1016/S0013-4694\(98\)00092-3](https://doi.org/10.1016/S0013-4694(98)00092-3)

- Cooke, S. F., & Bear, M. F. (2012). Stimulus-selective response plasticity in the visual cortex: an assay for the assessment of pathophysiology and treatment of cognitive impairment associated with psychiatric disorders. *Biological psychiatry*, 71(6), 487-495. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2011.09.006>
- Coombes, S. A., Janelle, C. M., & Duley, A. R. (2005). Emotion and motor control: Movement attributes following affective picture processing. *Journal of Motor Behavior*, 37(6), 425-436. <https://doi.org/10.3200/JMBR.37.6.425-436>
- Coombes, S. A., Tandonnet, C., Fujiyama, H., Janelle, C. M., Cauraugh, J. H., & Summers, J. J. (2009). Emotion and motor preparation: a transcranial magnetic stimulation study of corticospinal motor tract excitability. *Cognitive, affective & behavioral neuroscience*, 9(4), 380-388. <https://doi.org/10.3758/CABN.9.4.380>
- Costa, M., & Ricci Bitti, P. E. (2002). Emozioni e sport. In D. Spinelli (Ed.), *Psicologia dello sport e del movimento umano* (pp. 80-96). Zanichelli.
- Cotterill, R. M. (2001). Cooperation of the basal ganglia, cerebellum, sensory cerebrum and hippocampus: possible implications for cognition, consciousness, intelligence and creativity. *Progress in Neurobiology*, 64(1), 1-33. [https://doi.org/10.1016/S0301-0082\(00\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S0301-0082(00)00058-7)
- Cotterill, S. (2010). Pre-performance routines in sport: current understanding and future directions. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 3(2), 132-153. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2010.488269>
- Cotterill, S. T. (2018). Virtual reality and sport psychology: Implications for applied practice. *Case Studies in Sport and Performance Psychology*, 2(1), 21-22. <https://doi.org/10.1123/cssep.2018-0002>
- Craft, L. L., Magyar, T. M., Becker, B. J., & Feltz, D. L. (2003). The relationship between the Competitive State Anxiety Inventory-2 and sport performance: A meta-analysis. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 25(1), 44-65. <https://doi.org/10.1123/jsep.25.1.44>
- Craig, A. D. (2009). How do you feel—now? The anterior insula and human awareness. *Nature Reviews Neuroscience*, 10, 59-70. <https://doi.org/10.1038/nrn2555>
- Critchley, H. D. (2005). Neural mechanisms of autonomic, affective, and cognitive integration. *The Journal of comparative neurology*, 493(1), 154-166. <https://doi.org/10.1002/cne.20749>
- Critchley, H., Wiens, S., Rotshtein, P., Öhman, A., Dolan, R. J. (2004). Neural systems supporting interoceptive awareness. *Nature Neuroscience*, 7, 189-195. <https://doi.org/10.1038/nn1176>
- Crombie, D., Lombard, C., & Noakes, T. (2009). Emotional intelligence scores predict team sports performance in a national cricket competition. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 4(2), 209-224. <https://doi.org/10.1260/174795409788549544>

- Cumming, J., & Ramsey, R. (2008). Imagery interventions in sport. In *Advances in applied sport psychology* (pp. 15-46). Routledge.
- Cunha, L. A., Costa, J. A., Marques, E. A., Brito, J., Lastella, M., & Figueiredo, P. (2023). The Impact of Sleep Interventions on Athletic Performance: A Systematic Review. *Sports Medicine Open*, 9(1), 58. <https://doi.org/10.1186/s40798-023-00599-z>
- Cupal, D. D., & Brewer, B. W. (2001). Effects of relaxation and guided imagery on knee strength, reinjury anxiety, and pain following anterior cruciate ligament reconstruction. *Rehabilitation Psychology*, 46(1), 28–43. <https://doi.org/10.1037/0090-5550.46.1.28>
- Dan, Y., & Poo, M. M. (2006). Spike timing-dependent plasticity: from synapse to perception. *Physiological reviews*, 86(3), 1033-1048. <https://doi.org/10.1152/physrev.00030.2005>
- Dane, S., & Erzurumluoglu, A. (2003). Sex and handedness differences in eye–hand visual reaction times in handball players. *International Journal of Neuroscience*, 113(7), 923–929. <https://doi.org/10.1080/00207450390220367>
- *Darrow, C. W. (1947). Psychological and psychophysiological significance of the electroencephalogram. *Psychological Review*, 54(3), 157.
- Dart, A. M., Du, X. J., & Kingwell, B. A. (2002). Gender, sex hormones and autonomic nervous control of the cardiovascular system. *Cardiovascular Research*, 53, 678–687. [https://doi.org/10.1016/s0008-6363\(01\)00508-9](https://doi.org/10.1016/s0008-6363(01)00508-9)
- *Darwin, C. (1872). *The expression of the emotions in man and animals*. John Murray.
- Da Silva, F. A. K., Penachini da Costa de Rezende Barbosa, M., Marques Vanderlei, F., Destro Christofaro, D. G., & Marques Vanderlei, L. C. (2016). Application of heart rate variability in diagnosis and prognosis of individuals with diabetes mellitus: Systematic review. *Annals of Noninvasive Electrocardiology: The Official Journal of the International Society for Holter and Noninvasive Electrocardiology, Inc*, 21(3), 223–235. <https://10.1111/anec.12372>
- Davidson, R. J. (1988). EEG measures of cerebral asymmetry: Conceptual and methodological issues. *International Journal of Neuroscience*, 39(1–2), 71–89. <https://doi.org/10.3109/00207458808985694>
- Dawson, M. E., Schell, A. M., & Fillion, D. L. (2007). The electrodermal system. *Handbook of psychophysiology*, 2, 200-223.
- De Brito, M. A., Fernandes, J. R., Esteves, N. S., Müller, V. T., Alexandria, D. B., Pérez, D. I. V., Slimani, M., Brito, C. J., Bragazzi, N. L., & Miarka, B. (2022). The Effect of Neurofeedback on the Reaction Time and Cognitive Performance of Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in human neuroscience*, 16, 868450. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.868450>
- *Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1985). *Intrinsic Motivation and Self-Determination in Human Behavior*. Springer.

- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2000). The “what” and “why” of goal pursuits: human needs and the self-determination of behavior. *Psychological Inquiry*, 11(4), 227-268. https://doi.org/10.1207/S15327965PLI1104_01
- Delk, K. K., Gevirtz, R., Hicks, D. A., Carden, F., & Rucker, R. (1994). The effects of biofeedback assisted breathing retraining on lung functions in patients with cystic fibrosis. *Chest*, 105(1), 23-28.
- De Luca, C. J., & Mambrito, B. (1987). Voluntary control of motor units in human antagonist muscles: coactivation and reciprocal activation. *Journal of neurophysiology*, 58(3), 525-542. <https://doi.org/10.1152/jn.1987.58.3.525>
- De Luca, C. J. (1997). The use of surface electromyography in biomechanics. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(2), 135–163. <https://doi.org/10.1123/jab.13.2.135>
- Dempster, T. (2012). *An investigation into the optimum training paradigm for alpha electroencephalographic biofeedback*. Canterbury Christ Church University.
- Di Cara, L. V., & Miller, N. Ed. (1968). Changes in heart rate instrumentally learned by curarized rats as avoidance responses. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 65(1), 8–12. <https://doi.org/10.1037/h0025406>
- Didymus, F. F., & Fletcher, D. (2017). Effects of a cognitive-behavioral intervention on field hockey players’ appraisals of organizational stressors, emotions, and performance satisfaction. *Psychology of Sport and Exercise*, 30, 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2017.03.005>
- Dillon, A., Kelly, M., Robertson, I. H., & Robertson, D. A. (2016). Smartphone applications utilizing biofeedback can aid stress reduction. *Frontiers in psychology*, 7, 832. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00832>
- Dingenen, B., & Gokeler, A. (2017). Optimization of the return-to-sport paradigm after anterior cruciate ligament reconstruction: A critical step back to move forward. *Sports Medicine*, 47, 1487–1500. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0674-6>
- Dolcos, F., LaBar, K. S., & Cabeza, R. (2005). Remembering one year later: role of the amygdala and the medial temporal lobe memory system in retrieving emotional memories. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(7), 2626-2631. <https://doi.org/10.1073/pnas.0409848102>
- Domes, G., Heinrichs, M., Michel, A., Berger, C., & Herpertz, S. C. (2007). Oxytocin improves “mind-reading” in humans. *Biological Psychiatry*, 61(6), 731–733. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.07.015>
- Domingos, C., Alves, C. P., Sousa, E., Rosa, A., & Pereira, J. G. (2020). Does neurofeedback training improve performance in athletes? *NeuroRegulation*, 7(1), 8–15. <https://doi.org/10.15540/nr.7.1.8>
- Domingos, C., Silva, C. M. D., Antunes, A., Prazeres, P., Esteves, I., & Rosa, A. C. (2021). The Influence of an Alpha Band Neurofeedback Training in Heart Rate Variability in

- Athletes. *International journal of environmental research and public health*, 18(23), 12579. <https://doi.org/10.3390/ijerph182312579>
- Donghai, H., Abdul Wahab, M. N., & Xiuling, Z. (2024). Effect of heart rate variability biofeedback training on score and stress level of shooting athletes. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 9, 115–122. <https://doi.org/10.21834/e-bpj.v9iSI20.6101>
- Doran, G. T. (1981). There's a SMART way to write management's goals and objectives. *Management Review*, 70, 35–36.
- Dos Anjos, F. V., Cabral, H. V., de Oliveira Silva, A., Vieira, T. M., & de Oliveira, L. F. (2024). Assessing the feasibility of EMG biofeedback to reduce the upper trapezius muscle excitation during a seated row Exercise, a non-randomized comparative study. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 49(4), 577–587. <https://doi.org/10.1007/s10484-024-09657-y>
- Driediger, M., Hall, C., & Callow, N. (2006). Imagery use by injured athletes: a qualitative analysis. *Journal of sports sciences*, 24(3), 261–271. <https://doi.org/10.1080/02640410500128221>
- Düking, P., Holmberg, H.-C., & Sperlich, B. (2017). Instant biofeedback provided by wearable sensor technology can help to optimize exercise and prevent injury and overuse. *Frontiers in Physiology*, 8, Article 167. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00167>
- Dun, N. J., Machado, B. H., & Pilowsky, P. M. (Eds.). (2004). *Neural mechanisms of cardiovascular regulation*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9054-9>
- Dunlavey, C. J. (2018). Introduction to the hypothalamic-pituitary-adrenal axis: Healthy and dysregulated stress responses, developmental stress and neurodegeneration. *Journal of Undergraduate Neuroscience Education*, 16(2), R59–R60.
- Dupee, M. (2008). *Exploring a bio/neurofeedback training intervention to enhance psychological skills & performance in sport* [Master's thesis of Arts in Human Kinetics]. University of Ottawa. <https://ruor.uottawa.ca/server/api/core/bitstreams/287089a7-6797-4dfe-b7ed-e0385d8e5e20/content>
- Dworkin, B. R., & Miller, N. E. (1986). Failure to replicate visceral learning in the acute curarized rat preparation. *Behavioral Neuroscience*, 100(3), 299–314. <https://doi.org/10.1037/0735-7044.100.3.299>
- Edwards, W. B. (2018). Modeling overuse injuries in sport as a mechanical fatigue phenomenon. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 46(4), 224–231. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000163>
- Egner, T., & Gruzelier, J. H. (2001). Learned self-regulation of EEG frequency components affects attention and event-related brain potentials in humans. *Neuroreport*, 12(18), 4155–4159. <https://doi.org/10.1097/00001756-200112210-00058>

- Egner, T., & Gruzelier, J. H. (2003). Ecological validity of neurofeedback: Modulation of slow wave EEG enhances musical performance. *Neuroreport*, 14(9), 1221-1224.
- Egner, T., & Gruzelier, J. H. (2004). EEG biofeedback of low beta band components: frequency-specific effects on variables of attention and event-related brain potentials. *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 115(1), 131-139. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(03\)00353-5](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(03)00353-5)
- *Ekman, P. (1971). Universals and cultural differences in facial expressions of emotion. *Nebraska Symposium on Motivation*, 19, 207-283.
- *Ekman, P. (1992). An argument for basic emotions. *Cognition and Emotion*, 6(3-4), 169-200. <https://doi.org/10.1080/02699939208411068>
- *Ekman, P. (1993). Facial expression and emotion. *American Psychologist*, 48(4), 384-392. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.48.4.384>
- *Ekman, P., & Friesen, W. V. (1971). Constants across cultures in the face and emotion. *Journal of Personality and Social Psychology*, 17(2), 124-129. <https://doi.org/10.1037/h0030377>
- *Ekman, P., & Friesen, W. V. (1974). Detecting deception from the body or face. *Journal of Personality and Social Psychology*, 29(3), 288-298. <https://doi.org/10.1037/h0036006>
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1978). *Facial Action Coding System (FACS)* [Database record]. APA PsycTests. <https://doi.org/10.1037/t27734-000>
- Elfenbein, H. A., & Ambady, N. (2002). On the universality and cultural specificity of emotion recognition: a meta-analysis. *Psychological bulletin*, 128(2), 203-235. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.128.2.203>
- Elghozi, J. L., Laude, D., & Girard, A. (1991). Effects of respiration on blood pressure and heart rate variability in humans. *Clinical and experimental pharmacology and physiology*, 18(11), 735-742. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1681.1991.tb01391.x>
- Engel, A. K., & Singer, W. (2001). Temporal binding and the neural correlates of sensory awareness. *Trends in cognitive sciences*, 5(1), 16-25. [https://doi.org/10.1016/s1364-6613\(00\)01568-0](https://doi.org/10.1016/s1364-6613(00)01568-0)
- Engel, G. L. (1977). The need for a new medical model: A challenge for biomedicine. *Science*, 196, 129-136. <https://doi.org/10.1126/science.847460>
- Enoka, R. M. (2015). *Neuromechanics of Human Movement*. Human Kinetics.
- Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2008). Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *The Journal of physiology*, 586(1), 11-23. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.139477>

- Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2016). Translating Fatigue to Human Performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 48(11), 2228–2238. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000929>
- Estrella, T., Alfonso, C., Ramos-Castro, J., Alsina, A., & Capdevila, L. (2023). A serious game to self-regulate heart rate variability as a technique to manage arousal level through cardiorespiratory biofeedback: development and pilot evaluation study. *JMIR serious games*, 11, e46351. <https://doi.org/10.2196/46351>
- Evans, L., & Hardy, L. (2002). Injury rehabilitation: a goal-setting intervention study. *Research quarterly for exercise and sport*, 73(3), 310–319. <https://doi.org/10.1080/02701367.2002.10609025>
- Evans, L., Hardy, L., Mitchell, I., & Rees, T. (2008). The development of a measure of psychological responses to injury. *Journal of sport rehabilitation*, 17(1), 21–37. <https://doi.org/10.1123/jsr.17.1.21>
- Evans, L., Wadey, R., Hanton, S., & Mitchell, I. (2012). Stressors experienced by injured athletes. *Journal of sports sciences*, 30(9), 917–927. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.682078>
- Eysenck, M. W., Derakshan, N., Santos, R., & Calvo, M. G. (2007). Anxiety and cognitive performance: attentional control theory. *Emotion*, 7(2), 336–353. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.7.2.336>
- Fadhli, M., Brick, B., Setyosari, P., Ulfa, S., & Kuswandi, D. (2020). A meta-analysis of selected studies on the effectiveness of gamification method for children. *International Journal of Instruction*, 13(1), 845–854. <https://doi.org/10.29333/iji.2020.13154a>
- Faridnia, M., Shojaei, M., & Rahimi, A. (2012). The effect of neurofeedback training on the anxiety of elite female swimmers. *Annals of Biological Research*, 3(2), 1020–1028.
- Feltz, D. L., & Landers, D. M. (1983). The effects of mental practice on motor skill learning and performance: A meta-analysis. *Journal of Sport Psychology*, 5(1), 25–57. <https://doi.org/10.1123/jsp.5.1.25>
- Fletcher, D., & Sarkar, M. (2012). A grounded theory of psychological resilience in Olympic champions. *Psychology of Sport and Exercise*, 13(5), 669–678. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2012.04.007>
- Ford, K. R., DiCesare, C. A., Myer, G. D., & Hewett, T. E. (2015). Real-time biofeedback to target risk of anterior cruciate ligament injury: a technical report for injury prevention and rehabilitation. *Journal of sport rehabilitation*, 24(2). <https://doi.org/10.1123/jsr.2013-0138>
- Franco, C., Fleury, A., Guméry, P. Y., Diot, B., Demongeot, J., & Vuillerme, N. (2012). iBalance-ABF: a smartphone-based audio-biofeedback balance system. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 60(1), 211–215. <https://doi.org/10.1109/TBME.2012.2222640>

- Frank J. D. (1982). Biofeedback and the placebo effect. *Biofeedback and self-regulation*, 7(4), 449–460. <https://doi.org/10.1007/BF00998885>
- Frank, D. L., Khorshid, L., Kiffer, J. F., Moravec, C. S., & McKee, M. G. (2010). Biofeedback in medicine: who, when, why and how?. *Mental health in family medicine*, 7(2), 85–91.
- Fredrickson, B. L. (1998). What good are positive emotions? *Review of General Psychology*, 2(3), 300-319. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.2.3.300>
- Fredrickson, B. L. (2001). The role of positive emotions in positive psychology: the broaden-and-build theory of positive emotions. *American Psychologist*, 56(3), 218-226. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.56.3.218>
- Freedman, R. R., & Ianni, P. (1983). Self-control of digital temperature: Physiological factors and transfer effects. *Psychophysiology*, 20(6), 682-689. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1983.tb00938.x>
- Freedman, R. R., Morris, M., Norton, D. A., Masselink, D., Sabharwal, S. C., & Mayes, M. (1988). Physiological mechanism of digital vasoconstriction training. *Biofeedback and Self-regulation*, 13(4), 299-305. <https://doi.org/10.1007/BF00999086>
- Freedman, R.R. Physiological mechanisms of temperature biofeedback. *Biofeedback and Self-Regulation* 16, 95–115 (1991). <https://doi.org/10.1007/BF01000184>
- Freeman, P., & Rees, T. (2010). Perceived social support from team-mates: Direct and stress-buffering effects on self-confidence. *European Journal of Sport Science*, 10(1), 59–67. <https://doi.org/10.1080/17461390903049998>
- French, S. N. (1980). Electromyographic biofeedback for tension control during fine motor skill acquisition. *Biofeedback and Self-Regulation*, 5, 221–228. <https://doi.org/10.1007/BF00998597>
- Friebs, M. A., Whelan, E., Gldenpenning, I., Krause, D., & Weigelt, M. (2022). Stimulating performance: A scoping review on transcranial electrical stimulation effects on olympic sports. *Psychology of Sport and Exercise*, 59, 102130. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2021.102130>
- Frijda, N. H. (1986). *The emotions*. Cambridge University Press.
- Frith, C. D., Friston, K., Liddle, P. F., & Frackowiak, R. S. (1991). Willed action and the prefrontal cortex in man: a study with PET. *Proceedings. Biological sciences*, 244(1311), 241–246. <https://doi.org/10.1098/rspb.1991.0077>
- Fuchs, T., Birbaumer, N., Lutzenberger, W., Gruzelier, J. H., & Kaiser, J. (2003). Neurofeedback treatment for attention-deficit/hyperactivity disorder in children: a comparison with methylphenidate. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 28(1), 1–12. <https://doi.org/10.1023/a:1022353731579>

- Gandrapu, A., & Rakesh, K. R. (2024). Sports psychology: Mental skills training and performance enhancement strategies for athletes. *Innovations in Sports Science*, 1(3), 1–4. <https://doi.org/10.36676/iss.v1.i3.13>
- Giggins, O. M., Persson, U. M., & Caulfield, B. (2013). Biofeedback in rehabilitation. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 10(1), 60. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-10-60>
- Gill, D. L. (1994). A sport and exercise psychology perspective on stress. *Quest*, 46, 20-27.
- Giraldo-Pedroza, A., Lee, W. C. C., Lam, W. K., Coman, R., & Alici, G. (2020). Effects of wearable devices with biofeedback on biomechanical performance of running—a systematic review. *Sensors*, 20(22), 6637. <https://doi.org/10.3390/s20226637>
- Giza, C. C., & Hovda, D. A. (2001). The Neurometabolic Cascade of Concussion. *Journal of athletic training*, 36(3), 228–235.
- Glaser, R., & Kiecolt-Glaser, J. K. (2005). Stress-induced immune dysfunction: implications for health. *Nature reviews. Immunology*, 5(3), 243–251. <https://doi.org/10.1038/nri1571>
- Goldstein, D.S. (2010). Adrenaline and Noradrenaline. In eLS, (Ed.). <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0001401.pub2>
- Goleman, D. (1995). *Emotional Intelligence*. Bantam Books.
- Goleman, D. (1998). *Working with Emotional Intelligence*. Bloomsbury.
- Gong, A., Gu, F., Nan, W., Qu, Y., Jiang, C., & Fu, Y. (2021). A Review of Neurofeedback Training for Improving Sport Performance From the Perspective of User Experience. *Frontiers in neuroscience*, 15, 638369. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.638369>
- Gould, D., & Krane, V. (1992). The arousal–athletic performance relationship: Current status and future directions. In T. S. Horn (Ed.), *Advances in sport psychology* (pp. 119–142). Human Kinetics.
- Graczyk, M., Pąchalska, M., Ziółkowski, A., Mańko, G., Łukaszewska, B., Kochanowicz, K., ... & Kropotov, I. D. (2014). Neurofeedback training for peak performance. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 21(4), 871-875. <https://doi.org/10.5604/12321966.1129950>
- Green, E., Green, A., & Walters, E. (1970). Voluntary control of internal states: Psychological and physiological. *Journal of Transpersonal Psychology*, 2, 1–26.
- Grinberg, A., Strong, A., Strandberg, J., Selling, J., Liebermann, D. G., Björklund, M., & Häger, C. K. (2024). Electro cortical activity associated with movement-related fear: a methodological exploration of a threat-conditioning paradigm involving destabilising perturbations during quiet standing. *Experimental brain research*, 242(8), 1903–1915. <https://doi.org/10.1007/s00221-024-06873-0>

- Grooms, D. R., Page, S. J., Nichols-Larsen, D. S., Chaudhari, A. M., White, S. E., & Onate, J. A. (2017). Neuroplasticity Associated With Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 47(3), 180–189. <https://doi.org/10.2519/jospt.2017.7003>
- Gross, J. J. (1998). The emerging field of emotion regulation: an integrative review. *Review of General Psychology*, 2(3), 271–299. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.2.3.271>
- Gross, J. J. (1998). The emerging field of emotion regulation: An integrative review. *Review of General Psychology*, 2(3), 271–299. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.2.3.271>
- Gross, J. J. (2015). Emotion regulation: Current status and future prospects. *Psychological Inquiry*, 26(1), 1–26. <https://doi.org/10.1080/1047840X.2014.940781>
- Gross, J. J. (Ed.). (2014). *Handbook of emotion regulation* (2nd ed.). The Guilford Press.
- Gross, D., & Kohlmann, C. W. (2021). Increasing Heart Rate Variability through Progressive Muscle Relaxation and Breathing: A 77-Day Pilot Study with Daily Ambulatory Assessment. *International journal of environmental research and public health*, 18(21), 11357. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111357>
- Gross, M. J., Shearer, D. A., Bringer, J. D., Hall, R., Cook, C. J., & Kilduff, L. P. (2016). Abbreviated resonant frequency training to augment heart rate variability and enhance on-demand emotional regulation in elite sport support staff. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 41, 263–274 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10484-015-9330-9>
- Gruzelier, J. H. (2014). EEG-neurofeedback for optimising performance. I: A review of cognitive and affective outcome in healthy participants. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 124–141. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.09.015>
- Gruzelier, J. H. (2014). EEG-neurofeedback for optimising performance. II: Creativity, the performing arts and ecological validity. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 142–158. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.03.015>
- Gruzelier, J. H. (2018). Enhancing Creativity with Neurofeedback in the Performing Arts: Actors, Musicians, Dancers. In: Burgoyne, S. (eds) *Creativity in Theatre. Creativity Theory and Action in Education*, vol 2. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78928-6_14
- Gruzelier J. H. (2009). A theory of alpha/theta neurofeedback, creative performance enhancement, long distance functional connectivity and psychological integration. *Cognitive processing*, 10 Suppl 1, S101–S109. <https://doi.org/10.1007/s10339-008-0248-5>
- Gruzelier, J. H., Holmes, P., Hirst, L., Bulpin, K. J., Rahman, S., van Run, C., & Leach, J. (2013). Replication of elite music performance enhancement following alpha/theta neurofeedback and application to novice performance and improvisation with SMR benefits. *Biological Psychology*, 95(1), 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.11.001>

- Gruzelier, J. H., Inoue, A., Smart, R., Steed, A., & Steffert, T. (2010). Acting performance and flow state enhanced with sensory-motor rhythm neurofeedback comparing ecologically valid immersive VR and training screen scenarios. *Neuroscience letters*, 480(2), 112–116. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2010.06.019>
- Gruzelier, J. H., Thompson, T., Redding, E., Brandt, R., & Steffert, T. (2014). Application of alpha/theta neurofeedback and heart rate variability training to young contemporary dancers: state anxiety and creativity. *International journal of psychophysiology : official journal of the International Organization of Psychophysiology*, 93(1), 105–111. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.05.004>
- Haab, T., Leinen, P., & Burkey, P. (2024). Role and effectiveness of surface EMG feedback in sports and orthopedic rehabilitation: A systematic review. *Exploratory Musculoskeletal Disorders*, 2, 391–407. <https://doi.org/10.37349/emd.2024.00065>
- Hall, J. E., & Hall, M. E. (2020). *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology E-Book*. Elsevier Health Sciences.
- Halvari, H., & Gjesme, T. (1995). Trait and state anxiety before and after competitive performance. *Perceptual and Motor Skills*, 81(3, Pt 2), 1059–1074. <https://doi.org/10.2466/pms.1995.81.3f.1059>
- Hammond D. C. (2005). Neurofeedback with anxiety and affective disorders. *Child and adolescent psychiatric clinics of North America*, 14(1), 105–vii. <https://doi.org/10.1016/j.chc.2004.07.008>
- Hammond, D. C. (2007). Neurofeedback for the enhancement of athletic performance and physical balance. *The Journal of the American Board of Sport Psychology*, 1, 1–9.
- Hammond, D. C. (2011). What is neurofeedback: An update. *Journal of Neurotherapy*, 15(4), 305–336. <https://doi.org/10.1080/10874208.2011.623090>
- Hammond, D. C., Bodenhamer-Davis, G., Gluck, G., Stokes, D., Hunt Harper, S., Trudeau, D., MacDonald, M., Lunt, J., & Kirk, L. (2011). Standards of practice for neurofeedback and neurotherapy: A position paper of the International Society for Neurofeedback & Research. *Journal of Neurotherapy*, 15(1), 54–64. <https://doi.org/10.1080/10874208.2010.545760>
- Han, D. H., Kim, J. H., Lee, Y. S., Bae, S. J., Bae, S. J., Kim, H. J., Sim, M. Y., Sung, Y. H., & Lyoo, I. K. (2006). Influence of temperament and anxiety on athletic performance. *Journal of Sports Science & Medicine*, 5(3), 381–389.
- Han, Y., Syed Ali, S. K. B., & Ji, L. (2022). Feedback for promoting motor skill learning in physical education: a trial sequential meta-analysis. *International journal of environmental research and public health*, 19(22), 15361. <https://doi.org/10.3390/ijerph192215361>
- Hanin, Y. L. (2000). *Emotions in sport*. Human Kinetics.

- Hanin, Y. L. (2003). Performance related emotional states in sport: a qualitative analysis. *Forum Qualitative Sozialforschung*, 4(1). <https://doi.org/10.17169/fqs-4.1.747>
- Hanslmayr, S., Sauseng, P., Doppelmayr, M., Schabus, M., & Klimesch, W. (2005). Increasing individual upper alpha power by neurofeedback improves cognitive performance in human subjects. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10484-005-2169-8>
- Hanton, S., Mellalieu, S. D., & Hall, R. (2002). Re-examining the competitive anxiety trait-state relationship. *Personality and Individual Differences*, 33(7), 1125–1136. [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(02\)00003-X](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(02)00003-X)
- Hardt, J. V., & Kamiya, J. (1978). Anxiety change through electroencephalographic alpha feedback seen only in high anxiety subjects. *Science*, 201(4350), 79–81. <https://doi.org/10.1126/science.663646>
- Hardy, L., & Parfitt, G. (1991). A catastrophe model of anxiety and performance. *British Journal of Psychology*, 82(2), 163–178. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1991.tb02391.x>
- Hardy, L., Parfitt, G., & Pates, J. (1994). Performance catastrophes in sport: a test of the hysteresis hypothesis. *Journal of sports sciences*, 12(4), 327–334. <https://doi.org/10.1080/02640419408732178>
- Harmon-Jones, E., Harmon-Jones, C., Fearn, M., Sigelman, J. D., & Johnson, P. (2008). Left frontal cortical activation and spreading of alternatives: Tests of the action-based model of dissonance. *Journal of Personality and Social Psychology*, 94(1), 1–15. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.94.1.1>
- Harmony, T. (2013). The functional significance of delta oscillations in cognitive processing. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7, 83. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00083>
- Hasan, J., & Broughton, R. (1994). Quantitative topographic EEG mapping during drowsiness and sleep onset. In R. D. Ogilvie & J. R. Harsh (Eds.), *Sleep onset: Normal and abnormal processes* (pp. 219–235). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/10166-013>
- Hashim, H. A., & Hanafi Ahmad Yusof, H. (2011). The effects of progressive muscle relaxation and autogenic relaxation on young soccer players' mood states. *Asian journal of sports medicine*, 2(2), 99–105. <https://doi.org/10.5812/asjsm.34786>
- Hatzigeorgiadis, A., Zourbanos, N., Goltisios, C., & Theodorakis, Y. (2008). Investigating the functions of self-talk: The effects of motivational self-talk on self-efficacy and performance in young tennis players. *The Sport Psychologist*, 22(4), 458–471. <https://doi.org/10.1123/tsp.22.4.458>
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior: A neuropsychological theory*. John Wiley and Sons.
- Heil, J. (1993). *Psychology of sport injury*. Human Kinetics Publishers.

- Heinrichs, M., Baumgartner, T., Kirschbaum, C., & Ehler, U. (2003). Social support and oxytocin interact to suppress cortisol and subjective responses to psychosocial stress. *Biological Psychiatry*, 54(12), 1389–1398. [https://doi.org/10.1016/S0006-3223\(03\)00465-7](https://doi.org/10.1016/S0006-3223(03)00465-7)
- Hernández-Mendo, A. (2009). Efectividad del Biofeedback Electromiográfico en la rehabilitación de lesiones deportivas. Un caso de fractura radio. *Revista de psicología general y aplicada*, 62(1-2), 83-89.
- Hernández-Mendo, A. (2011) Biofeedback electromiográfico en la rehabilitación de lesiones de rodilla. Estudio de dos casos en futbolistas profesionales. *Cuad. Psicol. Deporte*, 11, 71–80.
- Hernández-Mendo, A., & Morales-Sánchez, V. (2014). Efectividad del biofeedback electromiográfico en la rehabilitación de lesiones deportivas. *Revista de psicología del deporte*, 23(2), 489-500.
- Hillman, C. H., Erickson, K. I., & Kramer, A. F. (2008). Be smart, exercise your heart: Exercise effects on brain and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(1), 58–65. <https://doi.org/10.1038/nrn2298>
- Hommel B. (2004). Event files: feature binding in and across perception and action. *Trends in cognitive sciences*, 8(11), 494–500. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.08.007>
- Hughes, J. R. (2008). Gamma, fast, and ultrafast waves of the brain: Their relationships with epilepsy and behavior. *Epilepsy & Behavior*, 13(1), 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2008.01.011>
- Humińska-Lisowska, K. (2024). Dopamine in Sports: A Narrative Review on the Genetic and Epigenetic Factors Shaping Personality and Athletic Performance. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(21), 11602. <https://doi.org/10.3390/ijms252111602>
- Hodges, P. W., & Tucker, K. (2011). Moving differently in pain: a new theory to explain the adaptation to pain. *Pain*, 152(3), S90-S98. <https://doi.org/10.1016/j.pain.2010.10.020>
- Horowitz, S. (2006). Biofeedback applications: A survey of clinical research. *Alternative & complementary therapies*, 12(6), 275-281. <https://doi.org/10.1089/act.2006.12.275>
- Inglis, J., Campbell, D., & Donald, M. W. (1976). Electromyographic biofeedback and neuromuscular rehabilitation. *Canadian Journal of Behavioural Science*, 8(4), 299–323. <https://doi.org/10.1037/h0081957>
- Ivanenko, Y., & Gurfinkel, V. S. (2018). Human postural control. *Frontiers in neuroscience*, 12, 171. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00171>
- Izard, C. E. (2010). The many meanings/aspects of emotion: definitions, functions, activation, and regulation. *Emotion Review*, 2(4), 363-370. <https://doi.org/10.1177/1754073910374661>

- Jackson, J. H. (1958). Evolution and dissolution of the nervous system. In J. Taylor (Ed.), *Selected writings of John Hughlings Jackson: Evolution and dissolution of the nervous system, speech, various papers, addresses and lectures* (pp. 1–118). Staples Press.
- Jackson, D. C., Mueller, C. J., Dolski, I., Dalton, K. M., Nitschke, J. B., Urry, H. L., et al. (2003). Now you feel it, now you don't: Frontal brain electrical asymmetry and individual differences in emotion regulation. *Psychological Science*, 14(6), 612–617. https://doi.org/10.1046/j.0956-7976.2003.psci_1473.x
- Jackson, S. A., & Csikszentmihalyi, M. (1999). *Flow in sports: The keys to optimal experiences and performances*. Human Kinetics Books.
- Jacobs, G. D., & Snyder, D. (1996). Frontal brain asymmetry predicts affective style in men. *Behavioral Neuroscience*, 110(1), 3–6. <https://doi.org/10.1037/0735-7044.110.1.3>
- *Jacobson, E. (1938). *Progressive relaxation* (2nd ed.). Univ. Chicago Press.
- Jafari, H., Courtois, I., Van den Bergh, O., Vlaeyen, J. W. S., & Van Diest, I. (2017). Pain and respiration: a systematic review. *Pain*, 158(6), 995–1006. <https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000000865>
- James, W. (1884). What is an emotion? *Mind*, 9(34), 188–205. <https://doi.org/10.1093/mind/os-IX.34.188>
- Jasper, H. H. (1958). The ten–twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 10, 371–375.
- Jeannerod M. (1995). Mental imagery in the motor context. *Neuropsychologia*, 33(11), 1419–1432. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(95\)00073-c](https://doi.org/10.1016/0028-3932(95)00073-c)
- Jekauc, D., Fritsch, J., & Latinjak, A. T. (2021). Toward a theory of emotions in competitive sports. *Frontiers in psychology*, 12, 790423. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.790423>
- Jerath, R., Edry, J. W., Barnes, V. A., & Jerath, V. (2006). Physiology of long pranayamic breathing: neural respiratory elements may provide a mechanism that explains how slow deep breathing shifts the autonomic nervous system. *Medical hypotheses*, 67(3), 566–571. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2006.02.042>
- Jimenez Morgan, S., & Molina Mora, J. A. (2017). Effect of heart rate variability biofeedback on sport performance, a systematic review. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 42(3), 235–245. <https://doi.org/10.1007/s10484-017-9364-2>
- Johnston, L. H., & Carroll, D. (1998). The context of emotional responses to athletic injury: a qualitative analysis. *Journal of Sport Rehabilitation*, 7(3), 206–220. <https://doi.org/10.1123/jsr.7.3.206>
- Jones, G. (1995). More than just a game: research developments and issues in competitive anxiety in sport. *British journal of psychology*, 86(4), 449–478. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1995.tb02565.x>

- Jones, G., & Hanton, S. (2001). Pre-competitive feeling states and directional anxiety interpretations. *Journal of sports sciences*, 19(6), 385–395. <https://doi.org/10.1080/026404101300149348>
- Jones, J. G., & Hardy, L. (Eds.). (1990). *Stress and performance in sport*. John Wiley & Sons.
- Jones, M. V. (2003). Controlling emotions in sport. *The Sport Psychologist*, 17(4), 471–486. <https://doi.org/10.1123/tsp.17.4.471>
- Jowett S. (2017). Coaching effectiveness: the coach-athlete relationship at its heart. *Current opinion in psychology*, 16, 154–158. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2017.05.006>
- Jung, H., Yoo, H. J., Choi, P., Nashiro, K., Min, J., Cho, C., Thayer, J. F., Lehrer, P., & Mather, M. (2025). Changes in negative emotions across five weeks of HRV biofeedback intervention were mediated by changes in resting heart rate variability. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 50(1), 25–48. <https://doi.org/10.1007/s10484-024-09674-x>
- Kamiya, J. (1968). Conscious control of brain waves. *Psychology Today*, 1, 57–60.
- Kamiya, J. (2011). The first communications about operant conditioning of the EEG. *Journal of Neurotherapy*, 15(1), 65–73. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1080/10874208.2011.545764>
- Kanbara, K., & Fukunaga, M. (2016). Links among emotional awareness, somatic awareness and autonomic homeostatic processing. *BioPsychoSocial Medicine*, 10, 16. <https://doi.org/10.1186/s13030-016-0059-3>
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. (2021). *Principles of Neural Science* (6th ed., pp. 1646-1647). McGraw-Hill.
- Keefe, F. J. (1975). Conditioning changes in differential skin temperature. *Perceptual and Motor Skills*, 40(1), 283-288.
- Keefe, F. J. (1978). Biofeedback vs. instructional control of skin temperature. *Journal of behavioral medicine*, 1(4), 383-390.
- Keefe, F. J., & Gardner, E. T. (1979). Learned control of skin temperature: Effects of short-and long-term biofeedback training. *Behavior Therapy*, 10(2), 202-210.
- Keizer, A. W., Verschoor, M., Verment, R. S., & Hommel, B. (2010). The effect of gamma enhancing neurofeedback on the control of feature bindings and intelligence measures. *International journal of psychophysiology : official journal of the International Organization of Psychophysiology*, 75(1), 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2009.10.011>
- Kellmann, M., & Beckmann, J. (Eds.). (2018). *Sport, recovery and performance: Interdisciplinary insights*. Routledge.

- Kellmann, M., Bertollo, M., Bosquet, L., Brink, M., Coutts, A. J., Duffield, 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>
- Keltner, D., & Kring, A. M. (1998). Emotion, social function, and psychopathology. *Review of General Psychology*, 2(3), 320–342. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.2.3.320>
- Kerr, J. H. (1985a). A new perspective for sports psychology. In M. J. Apter, D. Fontana & S. Murgatroyd (Eds.), *Reversal theory: applications and developments* (pp. 89–102). University College Cardiff Press.
- Kerr, J. H. (1985b). The experience of arousal: a new basis for studying arousal effects in sport. *Journal of Sports Sciences*, 3(2), 169–179. <https://doi.org/10.1080/02640418508729749>
- Kerr, J. H. (1987). Structural phenomenology, arousal and performance. *Journal of Human Movement Studies*, 13, 211–229.
- Kerr, J. H. (1989). Anxiety, arousal and sport performance: An application of reversal theory. In D. Hackfort & C. D. Spielberger (Eds.), *Anxiety in Sport: An International Perspective* (pp. 137–151). Hemisphere.
- Khazan, I. Z. (2013). *The clinical handbook of biofeedback: A step-by-step guide for training and practice with mindfulness*. Wiley.
- Kim, H., Onate, J. A., Criss, C. R., Simon, J. E., Mischkowski, D., & Grooms, D. R. (2023). The relationship between drop vertical jump action-observation brain activity and kinesiphobia after anterior cruciate ligament reconstruction: A cross-sectional fMRI study. *Brain and behavior*, 13(2), e2879. <https://doi.org/10.1002/brb3.2879>
- King, N. J., & Montgomery, R. B. (1980). Biofeedback-induced control of human peripheral temperature: A critical review of literature. *Psychological Bulletin*, 88(3), 738–752. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.88.3.738>
- Kleber, B., Gruzelier, J., Bensch, M., & Birbaumer, N. (2008). Effects of EEGbiofeedback on professional singing performances. *Revista Espanola Psicologica*, 10, 77–61.
- Klem, G. H., Lüders, H. O., Jasper, H. H., & Elger, C. (1999). The ten–twenty electrode system of the International Federation of Clinical Neurophysiology. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology Supplement*, 52, 3–6.
- Knaust, T., Felnhofer, A., Kothgassner, O. D., Höllmer, H., Gorzka, R. J., & Schulz, H. (2022). Exposure to virtual nature: the impact of different immersion levels on skin conductance level, heart rate, and perceived relaxation. *Virtual reality*, 26(3), 925-938. <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00595-2>
- Knott, V., Mahoney, C., Kennedy, S., & Evans, K. (2001). EEG power, frequency, asymmetry and coherence in male depression. *Psychiatry research*, 106(2), 123–140. [https://doi.org/10.1016/s0925-4927\(00\)00080-9](https://doi.org/10.1016/s0925-4927(00)00080-9)

- Knox, M., Lentini, J., Cummings, T. S., McGrady, A., Whearty, K., & Sancrant, L. (2011). Game-based biofeedback for paediatric anxiety and depression. *Mental Health in Family Medicine*, 8(3), 195–203.
- Knyazev, G. G. (2007). Motivation, emotion, and their inhibitory control mirrored in brain oscillations. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 31, 377–395. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.10.004>
- Knyazev, G. G. (2012). EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36, 677–695. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.10.002>
- Knyazev, G. G., Slobodskoj-Plusnin, J. Y., & Bocharov, A. V. (2009). Event-related delta and theta synchronization during explicit and implicit emotion processing. *Neuroscience*, 164, 1588–1600. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2009.09.057>
- Kober, S. E., Witte, M., Ninaus, M., Neuper, C., & Wood, G. (2013). Learning to modulate one's own brain activity: the effect of spontaneous mental strategies. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 695. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00695>
- Kober, S. E., Wood, G., & Berger, L. M. (2025). Controlling virtual reality with brain signals: State of the art of using VR-based feedback in neurofeedback applications. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 50, 593–612. <https://doi.org/10.1007/s10484-024-09677-8>
- Kolb, B., Gibb, R., & Robinson, T. E. (2003). Brain plasticity and behavior. *Current Directions in Psychological Science*, 12(1), 1–5. <https://doi.org/10.1111/1467-8721.01210>
- Kondo, K., Noonan, K. M., Freeman, M., Ayers, C., Morasco, B. J., & Kansagara, D. (2019). Efficacy of Biofeedback for Medical Conditions: an Evidence Map. *Journal of general internal medicine*, 34(12), 2883–2893. <https://doi.org/10.1007/s11606-019-05215-z>
- Kori, S. H., Miller, R. P., & Todd, D. D. (1990). Kinesiophobia: A new view of chronic pain behavior. *Pain Management*, 3, 35–43.
- Kos, A., Milutinović, V., & Umek, A. (2019). Challenges in wireless communication for connected sensors and wearable devices used in sport biofeedback applications. *Future generation computer systems*, 92, 582–592. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.03.032>
- Kosfeld, M., Heinrichs, M., Zak, P. J., & Fischbacher, U. (2005). Oxytocin increases trust in humans. *Nature*, 435(7042), 673–676. <https://doi.org/10.1038/nature03701>
- Kotchoubey, B., Strehl, U., Holzapfel, S., Blankenhorn, V., Fröscher, W., & Birbaumer, N. (1999). Negative potential shifts and the prediction of the outcome of neurofeedback therapy in epilepsy. *Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 110(4), 683–686. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(99\)00005-x](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(99)00005-x)

- Kothgassner, O. D., & Felnhöfer, A. (2021). Lack of research on efficacy of virtual reality exposure therapy (VRET) for anxiety disorders in children and adolescents. *Neuropsychiatrie*, 35(2), 68–75. <https://doi.org/10.1007/s40211-020-00349-7>
- Kothgassner, O. D., Goreis, A., Bauda, I., Ziegenaus, A., Glenk, L. M., & Felnhöfer, A. (2022). Virtual reality biofeedback interventions for treating anxiety : A systematic review, meta-analysis and future perspective. *Wiener klinische Wochenschrift*, 134(Suppl 1), 49–59. <https://doi.org/10.1007/s00508-021-01991-z>
- Kreibig, S. D. (2010). Autonomic nervous system activity in emotion: a review. *Biological psychology*, 84(3), 394–421. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2010.03.010>
- Kropotov, J. D. (2009). *Quantitative EEG, event-related potentials and neurotherapy*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374512-5.X0001-5>
- Kubota, Y., Sato, W., Toichi, M., Murai, T., Okada, T., Hayashi, A., & Sengoku, A. (2001). Frontal midline theta rhythm is correlated with cardiac autonomic activities during the performance of an attention demanding meditation procedure. *Cognitive Brain Research*, 11(2), 281–287. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(00\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(00)00086-0)
- Laborde, S., Dosseville, F., & Allen, M. S. (2016). Emotional intelligence in sport and exercise: A systematic review. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 26(8), 862–874. <https://doi.org/10.1111/sms.12510>
- Laborde, S., Dosseville, F., Guillén, F., & Chávez, E. (2014). Validity of the trait emotional intelligence questionnaire in sports and its links with performance satisfaction. *Psychology of Sport and Exercise*, 15, 481–490. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2014.05.001>
- Laborde, S., Mosley, E., & Thayer, J. F. (2017). Heart rate variability and cardiac vagal tone in psychophysiological research – recommendations for experiment planning, data analysis, and data reporting. *Frontiers in Psychology*, 8, 213. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00213>
- 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>
- Lagopoulos, J., Xu, J., Rasmussen, I., Vik, A., Malhi, G. S., Eliassen, C. F., Arntsen, I. E., Saether, J. G., Hollup, S., Holen, A., Davanger, S., & Ellingsen, Ø. (2009). Increased theta and alpha EEG activity during nondirective meditation. *Journal of alternative and complementary medicine (New York, N.Y.)*, 15(11), 1187–1192. <https://doi.org/10.1089/acm.2009.0113>
- Landers, D. M., Petruzzello, S. J., Salazar, W., Crews, D. J., Kubitz, K. A., Gannon, T. L., & Han, M. (1991). The influence of electrocortical biofeedback on performance in pre-elite archers. *Medicine and science in sports and exercise*, 23(1), 123–129.

- Lane, A. M., Beedie, C. J., Devonport, T. J., & Stanley, D. M. (2012). Instrumental emotion regulation in sport: relationships between beliefs about emotion and emotion regulation strategies used by athletes. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 22(4), 558-567. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2011.01364.x>
- Lane, A. M., & Wilson, M. (2011). Emotions and trait emotional intelligence among ultra-endurance runners. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 14(4), 358–362. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2011.03.001>
- Lange, C. G. (1885). *Om Sindsbevægelser: et psyko-fysiologisk Studie*. Jacob Lunds Forlag.
- Lange, C. G., & James, W. (1922). *The emotions* (I. A. Haupt, Trans.). Williams & Wilkins Company.
- Langer, K., Hagedorn, B., Stock, L. M., et al. (2020). Acute stress improves the effectivity of cognitive emotion regulation in men. *Scientific Reports*, 10, 11571. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68137-5>
- Latash, M. L. (2018). Muscle coactivation: Definitions, mechanisms, and functions. *Journal of Neurophysiology*, 120(1), Article e00084-18. <https://doi.org/10.1152/jn.00084.2018>
- Lazarus, R. S. (1991). *Emotion and adaptation*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195069945.001.0001>
- Lazzarelli, A., Scafuto, F., Crescentini, C., Matiz, A., Orrù, G., Ciacchini, R., Alfi, G., Gemignani, A., & Conversano, C. (2024). Interoceptive ability and emotion regulation in mind-body interventions: An integrative review. *Behavioral Sciences*, 14(11), 1107. <https://doi.org/10.3390/bs14111107>
- LeDoux, J. E. (1996). *The emotional brain: The mysterious underpinnings of emotional life*. Simon & Schuster.
- Ledwidge, P. S., Hartland, L. C., Brickman, K., Burkhart, S. O., & Abt, J. P. (2024). Challenges and Research Opportunities for Integrating Quantitative Electroencephalography Into Sports Concussion Rehabilitation. *Journal of sport rehabilitation*, 34(3), 278–286. <https://doi.org/10.1123/jsr.2024-0103>
- Lehrer, P., & Eddie, D. (2013). Dynamic processes in regulation and some implications for biofeedback and biobehavioral interventions. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 38(2), 143–155. <https://doi.org/10.1007/s10484-013-9217-6>
- Lehrer, P., & Gevirtz, R. (2014). Heart rate variability biofeedback: how and why does it work?. *Frontiers in psychology*, 5, 756. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00756>
- Lehrer, P., Kaur, K., Sharma, A., Shah, K., Huseby, R., Bhavsar, J., Sgobba, P., & Zhang, Y. (2020). Heart Rate Variability Biofeedback Improves Emotional and Physical Health and Performance: A Systematic Review and Meta Analysis. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 45(3), 109–129. <https://doi.org/10.1007/s10484-020-09466-z>

- Lehrer, P., Schoicket, S., Carrington, P., & Woolfolk, R. L. (1980). Psychophysiological and cognitive responses to stressful stimuli in subjects practicing progressive relaxation and clinically standardized meditation. *Behaviour Research and Therapy*, 18(4), 293-303. [https://doi.org/10.1016/0005-7967\(80\)90088-1](https://doi.org/10.1016/0005-7967(80)90088-1)
- Lehrer, P., Vaschillo, E., & Vaschillo, B. (2000). Resonant frequency biofeedback training to increase cardiac variability: Rationale and manual for training. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 25(3), 177-191. <https://doi.org/10.1023/A:1009554825745>
- Lehrer, P., Vaschillo, E., Vaschillo, B., Lu, S.-E., Eckberg, D. L., Edelberg, R., Shih, W. J., Lin, Y., Kuusela, T. A., Tahvanainen, K. U. O., & Hamer, R. M. (2003). Heart rate variability biofeedback increases baroreflex gain and peak expiratory flow. *Psychosomatic Medicine*, 65(5), 796-805. <https://doi.org/10.1097/01.PSY.0000089200.81962.19>
- Lehrer, P. M., Vaschillo, E., Vaschillo, B., Lu, S. E., Scardella, A., Siddique, M., & Habib, R. H. (2004). Biofeedback treatment for asthma. *Chest*, 126(2), 352-361. <https://doi.org/10.1378/chest.126.2.352>
- Levenson, R. W. (1994). Human emotions: a functional view. In P. Ekman & R. J. Davidson (Eds.), *The nature of emotion: fundamental questions* (pp. 123-126). Oxford University Press.
- Levin, M. F., Weiss, P. L., & Keshner, E. A. (2015). Emergence of virtual reality as a tool for upper limb rehabilitation: Incorporation of motor control and motor learning principles. *Physical Therapy*, 95(3), 415-425. <https://doi.org/10.2522/ptj.20130579>
- Levy, J. J., & Baldwin, D. R. (2019). Psychophysiology and biofeedback of sport performance. In M. H. Anshel, T. A. Petrie, & J. A. Steinfeldt (Eds.), *APA handbook of sport and exercise psychology: Sport psychology* (pp. 745-758). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0000123-037>
- Levy, A. R., Polman, R. C., & Clough, P. J. (2008). Adherence to sport injury rehabilitation programs: an integrated psycho-social approach. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 18(6), 798-809. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2007.00704.x>
- Li, Y., Ren, Y., Du, Z., Li, M., & Jiang, J. (2025). Competitive pressure, psychological resilience, and coping strategies in athletes' pre-competition anxiety. *Scientific reports*, 15(1), 35467. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-19213-1>
- Liang, D., Chen, S., Zhang, W., Xu, K., Li, Y., Li, D., Cheng, H., Xiao, J., Wan, L., & Liu, C. (2021). Investigation of a Progressive Relaxation Training Intervention on Precompetition Anxiety and Sports Performance Among Collegiate Student Athletes. *Frontiers in psychology*, 11, 617541. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.617541>
- *Linden, M. (2013, September 18-22). *QEEG and neurofeedback diagnosis and treatment for sports acquired traumatic brain injury (TBI)* [Conference presentation]. International Society for Neuronal Regulation Conference, Dallas, TX, United States.

- Liu, Y., Subramaniam, S. C. H., Sourina, O., Shah, E., Chua, J., & Ivanov, K. (2017). Neurofeedback training for rifle shooters to improve cognitive ability. In *Proceedings of the International Conference on Cyberworlds (CW 2017)* (pp. 1–6). IEEE.
- Locke, E. A., & Latham, G. P. (1990). *A theory of goal setting & task performance*. Prentice-Hall.
- Locke, E. A., & Latham, G. P. (2002). Building a practically useful theory of goal setting and task motivation: A 35-year odyssey. *American Psychologist*, 57(9), 705–717. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.57.9.705>
- Lonsdale, C., Hodge, K., & Rose, E. (2009). Athlete burnout in elite sport: a self-determination perspective. *Journal of sports sciences*, 27(8), 785–795. <https://doi.org/10.1080/02640410902929366>
- Loo, S. K., & Makeig, S. (2012). Clinical utility of EEG in attention-deficit/hyperactivity disorder: a research update. *Neurotherapeutics : the journal of the American Society for Experimental NeuroTherapeutics*, 9(3), 569–587. <https://doi.org/10.1007/s13311-012-0131-z>
- Lopes Martinez, V. M., Cardozo, P., Kaefer, A., Wulf, G., & Chiviacowsky, S. (2024). Positive feedback enhances motivation and skill learning in adolescents. *Learning and Motivation*, 86, 101966. <https://doi.org/10.1016/j.lmot.2024.101966>
- Lopez Blanco, C., & Tyler, W. J. (2025). The vagus nerve: A cornerstone for mental health and performance optimization in recreation and elite sports. *Frontiers in Psychology*, 16, 1639866. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1639866>
- Lorenzetti, V., Melo, B., Basílio, R., Suo, C., Yücel, M., Tierra-Criollo, C. J., & Moll, J. (2018). Emotion regulation using virtual environments and real-time fMRI neurofeedback. *Frontiers in neurology*, 9, 390. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00390>
- Loriette, C., Ziane, C., & Ben Hamed, S. (2021). Neurofeedback for cognitive enhancement and intervention and brain plasticity. *Revue neurologique*, 177(9), 1133–1144. <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2021.08.004>
- Lu, F. J., Li, G. S., Hsu, E. Y., & Williams, L. (2010). Relationship between athletes' emotional intelligence and precompetitive anxiety. *Perceptual and motor skills*, 110(1), 323–338. <https://doi.org/10.2466/PMS.110.1.323-338>
- Lubar, J. F. (1991). Discourse on the development of EEG diagnostics and biofeedback for attention-deficit/hyperactivity disorders. *Biofeedback and self-regulation*, 16(3), 201–225. <https://doi.org/10.1007/BF01000016>
- Lubar, J. F. (1995). Neurofeedback for the management of attention-deficit/hyperactivity disorders. In M. S. Schwartz (Ed.), *Biofeedback: A practitioner's guide* (2nd ed., pp. 493–522). The Guilford Press.
- *Ludwig C. (1847). Beitrage zur Kenntniss des Einflusses der Respirationen bewegungen auf den Blutlauf im Aortensysteme. *Arch. Anat. Physiol.* 13, 242–3027

- Luo, J., Du, R., Wang, X., & Luo, L. (2025). The relationship between social support and mental health in athletes: a systematic review and meta-analysis. *Frontiers in psychology*, 16, 1642886. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1642886>
- Lynch, M. A. (2004). Long-term potentiation and memory. *Physiological Reviews*, 84(1), 87–136. <https://doi.org/10.1152/physrev.00014.2003>
- Maddison, R., Prapavessis, H., & Clatworthy, M. (2006). Modeling and rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction. *Annals of behavioral medicine : a publication of the Society of Behavioral Medicine*, 31(1), 89–98. https://doi.org/10.1207/s15324796abm3101_13
- Mageau, G. A., & Vallerand, R. J. (2003). The coach–athlete relationship: A motivational model. *Journal of Sports Sciences*, 21(9), 883–904. <https://doi.org/10.1080/0264041031000140374>
- Makaracı, M., & Makaracı, Y. (2025). Enhancing autonomic regulation and attention through galvanic skin response and peripheral temperature biofeedback in female volleyball players: a randomized pilot trial. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 17(1), 274. <https://doi.org/10.1186/s13102-025-01344-7>
- Makaracı, M., Makaracı, Y., Zorba, E., & Lautenbach, F. (2024). Effects of Ten Biofeedback Sessions on Athletes' Physiological, Psychological, and Cognitive Functioning: A Randomized Controlled Trial with International Tennis Players. *Perceptual and motor skills*, 131(5), 1664-1686. <https://doi.org/10.1177/00315125241274834>
- Malik, O., & Senanayake, S. (2016). Impact of intelligent biofeedback during rehabilitation of professional athletes: A model for next generation smart healthcare system. *Sci. Bruneiana*, 15, 113–127. <https://doi.org/10.46537/scibru.v15i0.38>
- Mandolesi, L. (2017). *Manuale di psicologia generale dello sport*. Il Mulino.
- Mann, C. A., Serman, M. B., & Kaiser, D. A. (1996). Suppression of EEG rhythmic frequencies during somato-motor and visuo-motor behavior. *International Journal of Psychophysiology*, 23(1-2), 1-7. [https://doi.org/10.1016/0167-8760\(96\)00036-0](https://doi.org/10.1016/0167-8760(96)00036-0)
- Marras, W. S., Ferguson, S. A., Burr, D., Davis, K. G., & Gupta, P. (2004). Spine loading in patients with low back pain during asymmetric lifting exertions. *The Spine Journal*, 4(1), 64-75. [https://doi.org/10.1016/S1529-9430\(03\)00424-8](https://doi.org/10.1016/S1529-9430(03)00424-8)
- Martens, R. (1977). *Sport Competition Anxiety Test (SCAT)* [Database record]. APA PsycTests. <https://doi.org/10.1037/t27556-000>
- Martens, R., & Landers, D. M. (1969). Effect of anxiety, competition, and failure on performance of a complex motor task. *Journal of motor behavior*, 1(1), 1–9. <https://doi.org/10.1080/00222895.1969.10734829>
- Martens, R., & Landers, D. M. (1970). Motor performance under stress: a test of the inverted-U hypothesis. *Journal of Personality and Social Psychology*, 16(1), 29–37. <https://doi.org/10.1037/h0029787>

- Martens, R., Vealey, R. S., & Burton, D. (1980). *Competitive State Anxiety Inventory-2 (CSAI-2) manual*. Human Kinetics.
- Martens, R., Vealey, R. S., & Burton, D. (1990). *Competitive anxiety in sport*. Human Kinetics.
- Marzbani, H., Marateb, H. R., & Mansourian, M. (2016). Neurofeedback: A Comprehensive Review on System Design, Methodology and Clinical Applications. *Basic and clinical neuroscience*, 7(2), 143–158. <https://doi.org/10.15412/J.BCN.03070208>
- Masters, R. S. (1992). Knowledge, knerves and know-how: The role of explicit versus implicit knowledge in the breakdown of a complex motor skill under pressure. *British journal of psychology*, 83(3), 343–358. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1992.tb02446.x>
- Mathiak, K. A., Alawi, E. M., Koush, Y., Dyck, M., Cordes, J. S., Gaber, T. J., Zepf, F. D., Palomero-Gallagher, N., Sarkheil, P., Bergert, S., Zvyagintsev, M., & Mathiak, K. (2015). Social reward improves the voluntary control over localized brain activity in fMRI-based neurofeedback training. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 9, 136. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2015.00136>
- McCarthy, P. J. (2011). Positive emotion in sport performance: current status and future directions. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 4, 50–69. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2011.560955>
- McCrae, R. R., & Costa, P. T., Jr. (1999). A Five-Factor theory of personality. In L. A. Pervin & O. P. John (Eds.), *Handbook of personality: Theory and research* (2nd ed., pp. 139–153). Guilford Press.
- McCrea, M., Iverson, G. L., McAllister, T. W., Hammeke, T. A., Powell, M. R., Barr, W. B., & Kelly, J. P. (2009). An integrated review of recovery after mild traumatic brain injury (MTBI): implications for clinical management. *The Clinical neuropsychologist*, 23(8), 1368–1390. <https://doi.org/10.1080/13854040903074652>
- McCrea, M., Prichep, L., Powell, M. R., Chabot, R., & Barr, W. B. (2010). Acute effects and recovery after sport-related concussion: a neurocognitive and quantitative brain electrical activity study. *The Journal of head trauma rehabilitation*, 25(4), 283–292. <https://doi.org/10.1097/HTR.0b013e3181e67923>
- McCrory, P., Meeuwisse, W. H., Aubry, M., Cantu, B., Dvorák, J., Echemendia, R. J., Engebretsen, L., Johnston, K., Kutcher, J. S., Raftery, M., Sills, A., Benson, B. W., Davis, G. A., Ellenbogen, R. G., Guskiewicz, K., Herring, S. A., Iverson, G. L., Jordan, B. D., Kissick, J., McCrea, M., McIntosh, A. S., Maddocks, D., Makdissi, M., Purcell, L., Putukian, M., Schneider, K., Tator, C. H., & Turner, M. (2013). Consensus statement on concussion in sport: The 4th International Conference on Concussion in Sport held in Zurich, November 2012. *British Journal of Sports Medicine*, 47(5), 250–258. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-092313>
- McCrory, P., Meeuwisse, W., Dvořák, J., Aubry, M., Bailes, J., Broglio, S., Cantu, R. C., Cassidy, D., Echemendia, R. J., Castellani, R. J., Davis, G. A., Ellenbogen, R., Emery, C., Engebretsen, L., Feddermann-Demont, N., Giza, C. C., Guskiewicz, K. M., Herring,

- S., Iverson, G. L., Johnston, K. M., ... Vos, P. E. (2017). Consensus statement on concussion in sport-the 5th international conference on concussion in sport held in Berlin, October 2016. *British journal of sports medicine*, 51(11), 838–847. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-097699>
- McGrady, A. V., Yonker, R., Tan, S. Y., Fine, T. H., Davis, T. P., & Gordon, C. (1981). The effect of biofeedback-assisted relaxation training on blood pressure and selected biochemical parameters in patients with essential hypertension. *Biofeedback and Self-Regulation*, 6, 343–353. <https://doi.org/10.1007/BF01000659>
- McKee, M. G. (2008). Biofeedback: An overview in the context of heart-brain medicine. *Cleveland Clinic Journal of Medicine*, 75(2), S31-S34.
- McNair, D. M., Lorr, M., & Droppleman, L. F. (1971). *Profile of Mood States (POMS) manual*. Educational and Industrial Testing Service.
- Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., Raglin, J., Rietjens, G., Steinacker, J., & Urhausen, A. (2013). Prevention, diagnosis and treatment of the overtraining syndrome: Joint consensus statement of the European College of Sport Science (ECSS) and the American College of Sports Medicine (ACSM). *European Journal of Sport Science*, 13(1), 1–24. <https://doi.org/10.1080/17461391.2012.730061>
- Mellalieu, S., Hanton, S., & Fletcher, D. (2006). A competitive anxiety review: Recent directions in sport psychology research. In S. Hanton & S. D. Mellalieu (Eds.), *Literature reviews in sport psychology* (pp. 1–77). Nova Science Publishers.
- Melo, D. L. M., Carvalho, L. B. C., Prado, L. B. F., & Prado, G. F. (2019). Biofeedback Therapies for Chronic Insomnia: A Systematic Review. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 44(4), 259–269. <https://doi.org/10.1007/s10484-019-09442-2>
- Mennella, R., Patron, E., & Palomba, D. (2017). Frontal alpha asymmetry neurofeedback for the reduction of negative affect and anxiety. *Behaviour research and therapy*, 92, 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.brat.2017.02.002>
- Merletti, R., & Farina, D. (Eds.). (2016). *Surface electromyography: physiology, engineering, and applications*. John Wiley & Sons.
- Mesagno, C., & Beckmann, J. (2017). Choking under pressure: theoretical models and interventions. *Current Opinion in Psychology*, 16, 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2017.05.004>
- Mesagno, C., Marchant, D., & Morris, T. (2008). A pre-performance routine to alleviate choking in “choking-susceptible” athletes. *The Sport Psychologist*, 22(4), 439–457. <https://doi.org/10.1123/tsp.22.4.439>
- Micoulaud-Franchi, J. A., Kotwas, I., Lanteaume, L., Berthet, C., Bastien, M., Vion-Dury, J., McGonigal, A., & Bartolomei, F. (2014). Skin conductance biofeedback training in adults with drug-resistant temporal lobe epilepsy and stress-triggered seizures: a

- proof-of-concept study. *Epilepsy & behavior : E&B*, 41, 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2014.10.017>
- Mikicin, M., Orzechowski, G., Jurewicz, K., Paluch, K., Kowalczyk, M., & Wróbel, A. (2015). Brain-training for physical performance: a study of EEG-neurofeedback and alpha relaxation training in athletes. *Acta neurobiologiae experimentalis*, 75(4), 434–445. <https://doi.org/10.55782/ane-2015-2047>
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual review of neuroscience*, 24, 167–202. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>
- Miller, N. E., & Dworkin, B. K. (1974). Visceral learning: Recent difficulties with curarized rats and significant problems for human research. In P. A. Obrist, A. H. Black, J. Brener, & L. V. DiCara (Eds.), *Cardiovascular psychophysiology: Current issues in response mechanisms, biofeedback and methodology* (pp. 312–331). AldineTransaction.
- Mirifar, A., Beckmann, J., & Ehrlenspiel, F. (2017). Neurofeedback as supplementary training for optimizing athletes' performance: A systematic review with implications for future research. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 75, 419–432. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.02.005>
- Mirifar, A., Keil, A., Beckmann, J., & Ehrlenspiel, F. (2019). No effects of neurofeedback of beta band components on reaction time performance. *Journal of Cognitive Enhancement*, 3, 251–260. <https://doi.org/10.1007/s41465-018-0093-0>
- Moll, T., Jordet, G., & Pepping, G. J. (2010). Emotional contagion in soccer penalty shootouts: celebration of individual success is associated with ultimate team success. *Journal of Sports Sciences*, 28(9), 983–992. <https://doi.org/10.1080/02640414.2010.484068>
- Morabito, F. C., Ieracitano, C., & Mammone, N. (2023). An explainable Artificial Intelligence approach to study MCI to AD conversion via HD-EEG processing. *Clinical EEG and neuroscience*, 54(1), 51–60.
- Morales-Sánchez, V., Falcó, C., Hernández-Mendo, A., & Reigal, R. E. (2022). Efficacy of Electromyographic biofeedback in muscle recovery after meniscectomy in soccer players. *Sensors*, 22(11), 4024. <https://doi.org/10.3390/s22114024>
- Moran, A. P. (2004). *Sport and exercise psychology: a critical introduction*. Routledge.
- Musso, F., Brinkmeyer, J., Mobascher, A., Warbrick, T., & Winterer, G. (2010). Spontaneous brain activity and EEG microstates. A novel EEG/fMRI analysis approach to explore resting-state networks. *Neuroimage*, 52(4), 1149–1161. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.01.093>
- Myung S. J. (2010). Biofeedback therapy in constipation and fecal incontinence. *Journal of neurogastroenterology and motility*, 16(2), 110–112. <https://doi.org/10.5056/jnm.2010.16.2.110>

- Naeiji, M. J., & Mehrizi, M. M. (2014). The theory of multiple intelligences for athletes and cohesion in sports teams. *Arabian Journal of Business and Management Review (Kuwait Chapter)*, 3(7), 16-27.
- Nagai, Y., Jones, C. I., & Sen, A. (2019). Galvanic skin response (GSR)/electrodermal/skin conductance biofeedback on epilepsy: a systematic review and meta-analysis. *Frontiers in neurology*, 10, 377. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00377>
- Nelson, B. W., Low, C. A., Jacobson, N., Trivedi, S., & Sbarra, D. A. (2020). Guidelines for wrist-worn consumer wearable assessment of heart rate in biobehavioral research. *NPJ Digital Medicine*, 3, 90. <https://doi.org/10.1038/s41746-020-0297-4>
- Nestoriuc, Y., & Martin, A. (2007). Efficacy of biofeedback for migraine: A meta-analysis. *Pain*, 128(1–2), 111–127. <https://doi.org/10.1016/j.pain.2006.09.007>
- Nicholls, J. G. (1984). Achievement motivation: Conceptions of ability, subjective experience, task choice, and performance. *Psychological Review*, 91(3), 328–346. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.91.3.328>
- Nideffer, R. M. (1989). Theoretical and practical relationships between attention, anxiety, and performance in sport. In D. Hackfort & C. D. Spielberger (Eds.), *Anxiety in sport: An international perspective* (pp. 117–136). Hemisphere Pub. Corp.
- Nideffer, R. M. (1993). Focus and concentration in sport performance. In R. N. Singer, M. Murphey, & L. K. Tennant (Eds.), *Handbook of Research on Sport Psychology* (pp. 204-216). Macmillan.
- Niedermeyer, E., & Da Silva, F. L. (Eds.). (2005). *Electroencephalography: basic principles, clinical applications, and related fields*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Noakes, T. D. (2000). Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports: Review Article*, 10(3), 123-145. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2000.010003123.x>
- Norouzi, E., Hosseini, F. S., Vaezmosavi, M., Gerber, M., Pühse, U., & Brand, S. (2020). Effect of quiet eye and quiet mind training on motor learning among novice dart players. *Motor Control*, 24(2), 204–221. <https://doi.org/10.1123/mc.2018-0116>
- Nunez, P. L., & Srinivasan, R. (2006). *Electric fields of the brain: the neurophysics of EEG*. Oxford University Press.
- Nunez, S. G., Rabelo, S. P., Subotic, N., Caruso, J. W., & Knezevic, N. N. (2025). Chronic Stress and Autoimmunity: The Role of HPA Axis and Cortisol Dysregulation. *International journal of molecular sciences*, 26(20), 9994. <https://doi.org/10.3390/ijms26209994>
- Nussbaum, M. C. (2001). *Upheavals of thought: the intelligence of emotions*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511840715>

- Obrist, P. A., Howard, J. L., Lawler, J. E., Galosy, R. A., Meyers, K. A., & Gaebelein, C. J. (1974). The cardiac-somatic interaction. In P. A. Obrist, A. H. Black, J. Brener, & L. V. DiCara (Eds.), *Cardiovascular psychophysiology* (pp. 136–162). Aldine.
- Ommundsen, Y., & Pedersen, B. H. (1999). The role of achievement goal orientations and perceived ability upon somatic and cognitive indices of sport competition trait anxiety. A study of young athletes. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 9(6), 333–343. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.1999.tb00254.x>
- Onagawa, R., Muraoka, Y., Hagura, N., & Takemi, M. (2023). An investigation of the effectiveness of neurofeedback training on motor performance in healthy adults: A systematic review and meta-analysis. *NeuroImage*, 270, 120000. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120000>
- Ortega, E., & Wang, C. J. K. (2018). Pre-performance Physiological State: Heart Rate Variability as a Predictor of Shooting Performance. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 43(1), 75–85. <https://doi.org/10.1007/s10484-017-9386-9>
- Othmer, S., & Othmer, S. F. (2009). Post traumatic stress disorder—The neurofeedback remedy. *Biofeedback*, 37(1), 24–31. <https://doi.org/10.5298/1081-5937-37.1.24>
- Packard, M. G., & Knowlton, B. J. (2002). Learning and memory functions of the basal ganglia. *Annual Review of Neuroscience*, 25(1), 563–593. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.25.112701.142937>
- Pagaduan, J. C., Chen, Y. S., Fell, J. W., & Wu, S. S. X. (2020). Can Heart Rate Variability Biofeedback Improve Athletic Performance? A Systematic Review. *Journal of human kinetics*, 73, 103–114. <https://doi.org/10.2478/hukin-2020-0004>
- Paivio, A. (1995). Imagery and memory. In M. S. Gazzaniga (Ed.), *The cognitive neurosciences* (pp. 977–986). The MIT Press.
- Palidis, D. J., & Fellows, L. K. (2024). The affective response to positive performance feedback is associated with motor learning. *Experimental brain research*, 242(12), 2737–2747. <https://doi.org/10.1007/s00221-024-06931-7>
- Palmer, C. A., & Alfano, C. A. (2017). Sleep and emotion regulation: An organizing, integrative review. *Sleep Medicine Reviews*, 31, 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2015.12.006>
- Papousek, I., Reiser, E. M., Weber, B., Freudenthaler, H. H., & Schuster, G. (2012). Frontal brain asymmetry and affective flexibility in an emotional contagion paradigm. *Psychophysiology*, 49(4), 489–498. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011.01324.x>
- Papousek, I., Weiß, E. M., Schuster, G., Fink, A., Reiser, E. M., & Lackner, H. K. (2014). Prefrontal EEG alpha asymmetry changes while observing disaster happening to other people: Cardiac correlates and prediction of emotional impact. *Biological Psychology*, 103, 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2014.09.001>

- Parfitt, G., & Pates, J. (1999). The effects of cognitive and somatic anxiety and self-confidence on components of performance during competition. *Journal of sports sciences*, 17(5), 351–356. <https://doi.org/10.1080/026404199365867>
- Parsaee, S., Alboghbish, S., Abdolahi, H., Alirajabi, R., & Anbari, A. (2018). Effect of a period of selected SMR/Theta neurofeedback training on visual and auditory reaction time in veterans and disabled athletes. *Iranian Journal of War and Public Health*, 10(1), 15-20.
- Pascual-Marqui, R. D., Michel, C. M., & Lehmann, D. (1994). Low resolution electromagnetic tomography: a new method for localizing electrical activity in the brain. *International journal of psychophysiology : official journal of the International Organization of Psychophysiology*, 18(1), 49–65. [https://doi.org/10.1016/0167-8760\(84\)90014-x](https://doi.org/10.1016/0167-8760(84)90014-x)
- Paul, M., & Garg, K. (2012). The effect of heart rate variability biofeedback on performance psychology of basketball players. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 37(2), 131–144. <https://doi.org/10.1007/s10484-012-9185-2>
- Peeters, F., Ronner, J., Bodar, L., van Os, J., & Lousberg, R. (2014). Validation of a neurofeedback paradigm: Manipulating frontal EEG alpha-activity and its impact on mood. *International Journal of Psychophysiology*, 93(1), 116–120. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.06.010>
- Peng, W., Zhan, Y., Jiang, Y., Nan, W., Kadosh, R. C., & Wan, F. (2020). Individual variation in alpha neurofeedback training efficacy predicts pain modulation. *NeuroImage. Clinical*, 28, 102454. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2020.102454>
- Perez-Gaido, M., Lalanza, J. F., Parrado, E., & Capdevila, L. (2021). Can HRV Biofeedback Improve Short-Term Effort Recovery? Implications for Intermittent Load Sports. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 46(2), 215–226. <https://doi.org/10.1007/s10484-020-09495-8>
- Peris Delcampo, D., Núñez, A., Ortiz Marholz, P., Olmedilla, A., Cantón, E., Ponseti, J., & Garcia Mas, A. (2024). The bright side of sports: a systematic review on well-being, positive emotions and performance. *BMC Psychology*, 12(284). <https://doi.org/10.1186/s40359-024-01769-8>
- Perlini, A. H., & Halverson, T. R. (2006). Emotional intelligence in the National Hockey League. *Canadian Journal of Behavioural Science / Revue canadienne des sciences du comportement*, 38(2), 109–119. <https://doi.org/10.1037/cjbs2006001>
- Perlis, M. L., Merica, H., Smith, M. T., & Giles, D. E. (2001). Beta EEG activity and insomnia. *Sleep medicine reviews*, 5(5), 363–374. <https://doi.org/10.1053/smr.2001.0151>
- Perry, F. D., Shaw, L., & Zaichkowsky, L. (2011). Biofeedback and neurofeedback in sports. *Biofeedback*, 39(3), 95–100. <https://doi.org/10.5298/1081-5937-39.3.10>
- Phelps, E. A. (2004). Human emotion and memory: Interactions of the amygdala and hippocampal complex. *Current Opinion in Neurobiology*, 14(2), 198-202. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2004.03.015>

- Pochon, J. B., Levy, R., Fossati, P., Lehericy, S., Poline, J. B., Pillon, B., Le Bihan, D., & Dubois, B. (2002). The neural system that bridges reward and cognition in humans: An fMRI study. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(8), 5669–5674. <https://doi.org/10.1073/pnas.082111099>
- Podlog, L., Heil, J., & Schulte, S. (2014). Psychosocial factors in sports injury rehabilitation and return to play. *Physical medicine and rehabilitation clinics of North America*, 25(4), 915–930. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2014.06.011>
- Porges, S. W. (1995). Orienting in a defensive world: Mammalian modifications of our evolutionary heritage. A Polyvagal Theory. *Psychophysiology*, 32(4), 301–318. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1995.tb01213.x>
- Porges, S. W. (2009). The polyvagal theory: New insights into adaptive reactions of the autonomic nervous system. *Cleveland Clinic Journal of Medicine*, 76(Suppl. 2), S86–S90. <https://doi.org/10.3949/ccjm.76.s2.17>
- Porges, S. W. (2011). *The Polyvagal Theory: Neurophysiological foundations of emotions, attachment, communication, and self-regulation*. W. W. Norton & Company.
- Prichep, L. S., & John, E. R. (1992). QEEG profiles of psychiatric disorders. *Brain Topography*, 4, 249–257. <https://doi.org/10.1007/BF01135562>
- Pusenjak, N., Grad, A., Tusak, M., Leskovsek, M., & Schwarzlin, R. (2015). Can biofeedback training of psychophysiological responses enhance athletes' sport performance? A practitioner's perspective. *The Physician and sportsmedicine*, 43(3), 287–299. <https://doi.org/10.1080/00913847.2015.1069169>
- Raichle, M. E., MacLeod, A. M., Snyder, A. Z., Powers, W. J., Gusnard, D. A., & Shulman, G. L. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(2), 676–682. <https://doi.org/10.1073/pnas.98.2.676>
- Rasey, H., Lubar, J. F., McIntyre, A., Zoffuto, A., & Abbott, P. L. (1995). EEG biofeedback for the enhancement of attentional processing in normal college students. *Journal of Neurotherapy*, 1(3), 15–21. https://doi.org/10.1300/J184v01n03_03
- Raven, J. C. (1938). *Progressive matrices: A perceptual test of intelligence*. H. K. Lewis.
- Raymond, J., Sajid, I., Parkinson, L. A., & Gruzelier, J. H. (2005). Biofeedback and dance performance: a preliminary investigation. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 30(1), 64–73. <https://doi.org/10.1007/s10484-005-2175-x>
- Rees, T., & Hardy, L. (2004). Matching social support with stressors: Effects on factors underlying performance in tennis. *Psychology of Sport and Exercise*, 5(3), 319–337. [https://doi.org/10.1016/S1469-0292\(03\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S1469-0292(03)00018-9)
- Richaud, T., Lacaze, K., Fassio, A., Nicolas, P., Ourliac, M., Hennart, B., Ina, J. G., Sonnery-Cottet, B., & Cavaignac, E. (2024). How Biofeedback With Surface EMG Can Contribute to the Diagnosis and Treatment of AMI in the Knee. *Video journal of sports medicine*, 4(4), 26350254241241084. <https://doi.org/10.1177/26350254241241084>

- Rijken, N. H., Soer, R., de Maar, E., Prins, H., Teeuw, W. B., Peuscher, J., & Oosterveld, F. G. (2016). Increasing Performance of Professional Soccer Players and Elite Track and Field Athletes with Peak Performance Training and Biofeedback: A Pilot Study. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 41(4), 421–430. <https://doi.org/10.1007/s10484-016-9344-y>
- Rist, B., Glynn, T., & Pearce, A. (2020). The evolution of psychological response to athlete injury models for professional sport. *Journal of Science and Medicine*, 2(4), 1-14. <https://doi.org/10.37714/josam.v2i4.53>
- Robazza, C. (2018). Emotional Self-Regulation in Sport and Performance. In O. P. John (Ed.), *Oxford Research Encyclopedia of Psychology*. Oxford University Press
- Robazza, C., & Bortoli, L. (2007). Perceived impact of anger and anxiety on sporting performance in rugby players. *Psychology of Sport and Exercise*, 8(6), 875-896. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2006.07.005>
- Robazza, C., & Ruiz, M. C. (2018). Emotional self-regulation in sport and performance. In *Oxford Research Encyclopedia of Psychology*. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190236557.013.154>
- Robazza, C., Morano, M., Bortoli, L., & Ruiz, M. C. (2022). Perceived motivational climate influences athletes' emotion regulation strategies, emotions, and psychobiosocial experiences. *Psychology of Sport and Exercise*, 59, 102110. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2021.102110>
- Robazza, C., Morano, M., Bortoli, L., & Ruiz, M. C. (2023). Athletes' basic psychological needs and emotions: the role of cognitive reappraisal. *Frontiers in Psychology*, 14, 1205102. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1205102>
- Robazza, C., Pellizzari, M., & Hanin, Y. (2004). Emotion self-regulation and athletic performance: an application of the IZOF model. *Psychology of Sport and Exercise*, 5(4), 379–404. [https://doi.org/10.1016/S1469-0292\(03\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S1469-0292(03)00034-7)
- Rollo, S., Tracey, J., & Prapavessis, H. (2017). Effects of a heart rate variability biofeedback intervention on athletes' psychological responses following injury: A pilot study. *International Journal of Sports and Exercise Medicine*, 3(4), 1–14. <https://doi.org/10.23937/2469-5718/1510081>
- Ros, T., Enriquez-Geppert, S., Zotev, V., Young, K. D., Wood, G., Whitfield-Gabrieli, S., Wan, F., Vuilleumier, P., Vialatte, F., Van De Ville, D., Todder, D., Surmeli, T., Sulzer, J. S., Strehl, U., Sterman, M. B., Steiner, N. J., Sorger, B., Soekadar, S. R., Sitaram, R., Sherlin, L. H., ... Thibault, R. T. (2020). Consensus on the reporting and experimental design of clinical and cognitive-behavioural neurofeedback studies (CRED-nf checklist). *Brain: a journal of neurology*, 143(6), 1674–1685. <https://doi.org/10.1093/brain/awaa009>
- Rothman, K. J. (1974). Synergy and antagonism in cause-effect relationships. *American journal of epidemiology*, 99(6), 385–388. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a121626>

- Roy, R., de la Vega, R., Jensen, M. P., & Miró, J. (2020). Neurofeedback for pain management: A systematic review. *Frontiers in Neuroscience*, 14, 671. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00671>
- Roosink, M., Robitaille, N., McFadyen, B. J., et al. (2015). Real-time modulation of visual feedback of whole-body movements in a virtual mirror: Development and proof-of-concept. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 12, 2. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-12-2>
- Ruiz, M. C., & Robazza, C. (Eds.). (2021). *Feelings in sport: Theory, research, and practical implications for performance and well-being* (1st ed.). Routledge.
- Ruiz, M. C., Raglin, J. S., & Hanin, Y. L. (2017). The individual zones of optimal functioning (IZOF) model (1978–2014): Historical overview of its development and use. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 15(1), 41–63. <https://doi.org/10.1080/1612197X.2015.1041545>
- Rusciano, A., Corradini, G., & Stoianov, I. (2017). Neuroplus biofeedback improves attention, resilience, and injury prevention in elite soccer players. *Psychophysiology*, 54(6), 916–926. <https://doi.org/10.1111/psyp.12847>
- Russell, J. A. (1994). Is there universal recognition of emotion from facial expression? A review of the cross-cultural studies. *Psychological Bulletin*, 115(1), 102–141. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.115.1.102>
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American Psychologist*, 55(1), 68–78.
- Rydzik, Ł., Wąsacz, W., Ambroży, T., Javdaneh, N., Brydak, K., & Kopańska, M. (2023). The use of neurofeedback in sports training: systematic review. *Brain Sciences*, 13(4), 660. <https://doi.org/10.3390/brainsci13040660>
- Salimnejad, Z., Zandi, H., & Arsham, S. (2019). Effect of bio-neural feedback exercises on the performance of female rugby players. *International Journal of Motor Control and Learning*, 1(2), 10–18. <https://doi.org/10.29252/ijmcl.1.2.10>
- Salminen, S., Liukkonen, J., Hanin, Y., & Hyvönen, A. (1995). Anxiety and athletic performance of Finnish athletes: application of the zone of optimal functioning model. *Personality and Individual Differences*, 19(5), 725–729. [https://doi.org/10.1016/0191-8869\(95\)00096-O](https://doi.org/10.1016/0191-8869(95)00096-O)
- Sanei, S., & Chambers, J. A. (2007). *EEG signal processing*. John Wiley & Sons.
- Sari, I., & López-González, L. (2021). Effects of psychological interventions on competitive anxiety in sport: A meta-analysis. *Psychology of Sport and Exercise*, 56, 102001. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2021.102001>
- Sarkar, M., & Fletcher, D. (2014). Psychological resilience in sport performers: a review of stressors and protective factors. *Journal of sports sciences*, 32(15), 1419–1434. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.901551>

- Schachter, S., & Singer, J. E. (1962). Cognitive, social, and physiological determinants of emotional state. *Psychological Review*, 69(5), 379-399. <https://doi.org/10.1037/h0046234>
- Scherer, K. R. (2005). What are emotions? And how can they be measured? *Social Science Information*, 44(4), 695-729. <https://doi.org/10.1177/0539018405058216>
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84(1), 1-66. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.1.1>
- Schüler, J., Wegner, M., Plessner, H., & Eklund, R. C. (Eds.). (2023). *Sport and exercise psychology: Theory and application* (1st ed.). Springer.
- Schultz, J. H., & Luthe, W. (1959). *Autogenic training: A psychophysiologic approach to psychotherapy*. Grune & Stratton.
- Schultz, W. (2015). Neuronal reward and decision signals: from theories to data. *Physiological reviews*, 95(3), 853-951. <https://doi.org/10.1152/physrev.00023.2014>
- Schumann, A., Köhler, S., Brotte, L., & Bär, K. J. (2019). Effect of an eight-week smartphone-guided HRV-biofeedback intervention on autonomic function and impulsivity in healthy controls. *Physiological measurement*, 40(6), 064001. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/ab2065>
- Schwartz, M. (2018). *Biofeedback* (M. Schwartz, Ed.). IntechOpen.
- Schwartz, M. S., & Andrasik, F. (2003). *Biofeedback: A practitioner's guide* (4th ed.). Guilford Press.
- Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in public health*, 5, 258. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>
- Shaykevich, A., Grove, J. R., Jackson, B., Landers, G. J., & Dimmock, J. (2015). Auditory feedback improves heart rate moderation during moderate-intensity exercise. *Medicine and science in sports and exercise*, 47(5), 1046-1051. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000490>
- Shen, W., Yu, Y., Frias Bocanegra, J., Wheeler, P. C., & Fong, D. T. P. (2024). Enhancing running injury prevention strategies with real-time biofeedback: A systematic review and meta-analysis. *Journal of sports sciences*, 42(11), 981-992. <https://doi.org/10.1080/02640414.2024.2374637>
- Shouse, M. N., & Lubar, J. F. (1979). Operant conditioning of EEG rhythms and Ritalin in the treatment of hyperkinesis. *Biofeedback and Self-Regulation*, 4, 299-312. <https://doi.org/10.1007/BF00998960>
- Siegel, D. J. (1999). *The developing mind: How relationships and the brain interact to shape who we are*. Guilford Press.

- Silber, M. H., Ancoli-Israel, S., Bonnet, M. H., Chokroverty, S., Grigg-Damberger, M. M., Hirshkowitz, M., Kapen, S., Keenan, S. A., Kryger, M. H., Penzel, T., Pressman, M. R., & Iber, C. (2007). The visual scoring of sleep in adults. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 3(2), 121–131.
- Sitaram, R., Ros, T., Stoeckel, L., Haller, S., Scharnowski, F., Lewis-Peacock, J., Weiskopf, N., Blefari, M. L., Rana, M., Oblak, E., Birbaumer, N., & Sulzer, J. (2017). Closed-loop brain training: the science of neurofeedback. *Nature reviews. Neuroscience*, 18(2), 86–100. <https://doi.org/10.1038/nrn.2016.164>
- Skinner, B. F. (1953). *Science and human behavior*. Macmillan.
- Smith, B., Tamminen, K. A., Palmateer, T. M., Denton, M., Sabiston, C., Crocker, P. & Eys, M. (2016), Exploring emotions as social phenomena among Canadian varsity athletes. *Psychology of Sport and Exercise*, 27, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2016.07.010>
- Son, C., Hegde, S., Markert, C., Zahed, K., & Sasangohar, F. (2023). Use of a mobile biofeedback app to provide health coaching for stress self-management: Pilot quasi-experiment. *JMIR Formative Research*, 7(1), e41018. <https://doi.org/10.2196/41018>
- Spielberger, C. D. (1972). *Anxiety: current trends in theory and research*. Academic Press.
- Spielberger, C. D., Gorsuch, R. L., & Lushene, R. (1970). *Manual for the State-Trait Anxiety Inventory (STAI)*. Consulting Psychologists Press.
- Stanley, J., Peake, J. M., & Buchheit, M. (2013). Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: implications for training prescription. *Sports medicine*, 43(12), 1259–1277. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0083-4>
- Staufenbiel, S., Brouwer, A. M., Keizer, A., & Van Wouwe, N. (2014). Effect of beta and gamma neurofeedback on memory and intelligence in the elderly. *Biological Psychology*, 95, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.12.007>
- Sterman, M. B. (1996). Physiological origins and functional correlates of EEG rhythmic activities: implications for self-regulation. *Biofeedback and Self-regulation*, 21(1), 3-33. <https://doi.org/10.1007/BF02214147>
- Sterman, M. B., & Egner, T. (2006). Foundation and practice of neurofeedback for the treatment of epilepsy. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 31(1), 21–35. <https://doi.org/10.1007/s10484-006-9002-x>
- Stoyanova, S., Ivantchev, N., Gergov, T., & Yordanova, B. (2025). Mental resilience and mindfulness in athletes: A preliminary study across sports and experience levels. *Sports*, 13(10), 334. <https://doi.org/10.3390/sports13100334>
- Sukys, S., Tilindiene, I., Cesnaitiene, V. J., & Kreivyte, R. (2019). Does emotional intelligence predict athletes' motivation to participate in sports? *Perceptual and motor skills*, 126(2), 305-322. <https://doi.org/10.1177/0031512518825201>

- Sullivan, M. J. L., Bishop, S. R., & Pivik, J. (1995). The Pain Catastrophizing Scale: Development and validation. *Psychological Assessment*, 7(4), 524–532. <https://doi.org/10.1037/1040-3590.7.4.524>
- Sunadi, A., Ifadah, E., & Syarif, M. N. O. (2020). The effect of deep breathing relaxation to reduce post operative pain in lower limb fracture. *Enfermería Clínica*, 30, 143-145. <https://doi.org/10.1016/j.enfcli.2019.12.045>
- Surwillo, W. W. (1986). *Psychophysiology: Some simple concepts and models*. Charles C. Thomas.
- Sutton, S. K., & Davidson, R. J. (1997). Prefrontal brain asymmetry: A biological substrate of the behavioral approach and inhibition systems. *Psychological Science*, 8(3), 204–210. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1997.tb00413.x>
- Swann, C., Jackman, P. C., Lawrence, A., Hawkins, R. M., Goddard, S. G., Williamson, O., Schweickle, M. J., Vella, S. A., Rosenbaum, S., & Ekkekakis, P. (2022). The (over)use of SMART goals for physical activity promotion: A narrative review and critique. *Health Psychology Review*. <https://doi.org/10.1080/17437199.2021.2023608>
- Tamminen, K. A., & Crocker, P. R. E. (2013). "I control my own emotions for the sake of the team": emotional self-regulation and interpersonal emotion regulation among female high-performance curlers. *Psychology of Sport and Exercise*, 14(5), 737-747. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2013.05.002>
- Taub, E., & Emurian, C. S. (1976). Feedback-aided self-regulation of skin temperature with a single feedback locus: I. Acquisition and reversal training. *Biofeedback and Self-regulation*, 1(2), 147-168.
- Thatcher, J., Jones, M. V., & Lavalley, D. (Eds.). (2012). *Coping and Emotion in Sport*. Routledge.
- Thatcher, R. W. (2012). *Handbook of quantitative electroencephalography and EEG biofeedback* (2nd ed.). ANI Publishing.
- Thatcher, R. W., & Lubar, J. F. (2009). History of the scientific standards of QEEG normative databases. In T. H. Budzynski, H. K. Budzynski, J. R. Evans, & A. Abarbanel (Eds.), *Introduction to quantitative EEG and neurofeedback: Advanced theory and applications* (2nd ed., pp. 29–59). Academic Press.
- Thatcher, R. W., North, D., & Biver, C. (2005). EEG and intelligence: relations between EEG coherence, EEG phase delay and power. *Clinical neurophysiology*, 116(9), 2129-2141. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.04.026>
- Thayer, J. F., Åhs, F., Fredrikson, M., Sollers, J. J., & Wager, T. D. (2012). A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: Implications for heart rate variability as a marker of stress and health. *Neuroscience and Behavioural Reviews*, 36(2), 747–756. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.11.00>

- Thayer, J. F., Hansen, A. L., Saus-Rose, E., & Johnsen, B. H. (2009). Heart rate variability, prefrontal neural function, and cognitive performance: the neurovisceral integration perspective on self-regulation, adaptation, and health. *Annals of behavioral medicine : a publication of the Society of Behavioral Medicine*, 37(2), 141–153. <https://doi.org/10.1007/s12160-009-9101-z>
- Thayer, J. F., & Lane, R. D. (2000). A model of neurovisceral integration in emotion regulation and dysregulation. *Journal of affective disorders*, 61(3), 201–216. [https://doi.org/10.1016/S0165-0327\(00\)00338-4](https://doi.org/10.1016/S0165-0327(00)00338-4)
- Thayer, J. F., & Lane, R. D. (2009). Claude Bernard and the heart–brain connection: Further elaboration of a model of neurovisceral integration. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(2), 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.08.004>
- Thibault, R. T., Lifshitz, M., & Raz, A. (2016). The self-regulating brain and neurofeedback: Experimental science and clinical promise. *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior*, 74, 247–261. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.10.024>
- Thibault, R. T., MacPherson, A., Lifshitz, M., Roth, R. R., & Raz, A. (2018). Neurofeedback with fMRI: A critical systematic review. *NeuroImage*, 172, 786–807. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.12.071>
- Thom, R. (1975). *Structural stability and morphogenesis*. Benjamin-Addison-Wesley.
- Thompson, M., & Thompson, L. (2003). *The neurofeedback book: An introduction to basic concepts in applied psychophysiology*. Association for Applied Psychophysiology and Biofeedback.
- Tinius, T. P., & Tinius, K. A. (2000). Changes after EEG biofeedback and cognitive retraining in adults with mild traumatic brain injury and attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Neurotherapy*, 4(1), 27–44. https://doi.org/10.1300/J184v04n02_05
- Tokunaga, T., & Lyons, M. J. (2020). Enactive mandala: Audio-visualizing brain waves [Preprint]. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.13035>
- Tomarken, A. J., Davidson, R. J., Wheeler, R. E., & Doss, R. C. (1992). Individual differences in anterior brain asymmetry and fundamental dimensions of emotion. *Journal of Personality and Social Psychology*, 62(4), 676–687. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.62.4.676>
- Toomim, H., Mize, W., Kwong, P. C., Toomim, M., Marsh, R., Kozlowski, G. P., Kimball, M., & Rémond, A. (2005). Intentional increase of cerebral blood oxygenation using hemoencephalography (HEG): An efficient brain exercise therapy. *Journal of Neurotherapy*, 8(3), 5–21. https://doi.org/10.1300/J184v08n03_02
- Tosti, B., Corrado, S., Mancone, S., Di Libero, T., Carissimo, C., Cerro, G., Rodio, A., da Silva, V. F., Coimbra, D. R., Andrade, A., & Diotaiuti, P. (2024a). Neurofeedback Training Protocols in Sports: A Systematic Review of Recent Advances in Performance,

- Anxiety, and Emotional Regulation. *Brain sciences*, 14(10), 1036. <https://doi.org/10.3390/brainsci14101036>
- Tosti, B., Corrado, S., Mancone, S., Di Libero, T., Rodio, A., Andrade, A., & Diotaiuti, P. (2024b). Integrated use of biofeedback and neurofeedback techniques in treating pathological conditions and improving performance: a narrative review. *Frontiers in neuroscience*, 18, 1358481. <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1358481>
- Totterdell, P. (2000). Catching moods and hitting runs: mood linkage and subjective performance in professional sport teams. *Journal of Applied Psychology*, 85(6), 848-859. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.85.6.848>
- Toussaint, L., Nguyen, Q. A., Roettger, C., Dixon, K., Offenbächer, M., Kohls, N., Hirsch, J., & Sirois, F. (2021). Effectiveness of Progressive Muscle Relaxation, Deep Breathing, and Guided Imagery in Promoting Psychological and Physiological States of Relaxation. *Evidence-based complementary and alternative medicine: eCAM*, 2021, 5924040. <https://doi.org/10.1155/2021/5924040>
- Tracey, J. (2003). The emotional response to the injury and rehabilitation process. *Journal of Applied Sport Psychology*, 15(4), 279–293. <https://doi.org/10.1080/714044197>
- Treisman, A. (1996). The binding problem. *Current Opinion in Neurobiology*, 6, 171–178. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(96\)80070-5](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(96)80070-5)
- Üstündağ, A., Haydaroglu, S., Sayan, D., & Güngör, M. (2025). The relationship between social anxiety levels and effective communication skills of adolescents participating in sports. *Scientific reports*, 15(1), 15724. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00800-1>
- Vaitl, D., Birbaumer, N., Gruzelier, J., Jamieson, G. A., Kotchoubey, B., Kübler, A., Lehmann, D., Miltner, W. H., Ott, U., Pütz, P., Sammer, G., Strauch, I., Strehl, U., Wackermann, J., & Weiß, T. (2005). Psychobiology of altered states of consciousness. *Psychological bulletin*, 131(1), 98–127. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.131.1.98>
- Valovich McLeod, T. C., & Gioia, G. A. (2010). Cognitive rest: The often neglected aspect of concussion management. *International Journal of Athletic Therapy and Training*, 15(2), 1–3. <https://doi.org/10.1123/att.15.2.1>
- Van Rooij, M., Lobel, A., Harris, O., Smit, N., & Granic, I. (2016). DEEP: A biofeedback virtual reality game for children at-risk for anxiety. *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 1989–1997. <https://doi.org/10.1145/2851581.2892452>
- Vaughan, R. S., & Laborde, S. (2021). Attention, working-memory control, working-memory capacity, and sport performance: The moderating role of athletic expertise. *European journal of sport science*, 21(2), 240-249. <https://doi.org/10.1080/17461391.2020.1739143>

- Vealey, R. S. (1986). Conceptualization of sport-confidence and competitive orientation: Preliminary investigation and instrument development. *Journal of Sport Psychology*, 8(3), 221–246.
- Vealey, R. S. (2007). Mental skills training in sport. In G. Tenenbaum & R. C. Eklund (Eds.), *Handbook of sport psychology* (3rd ed., pp. 287–309). John Wiley & Sons, Inc.. <https://doi.org/10.1002/9781118270011.ch13>
- Verburgh, L., Scherder, E. J., van Lange, P. A., & Oosterlaan, J. (2016). The key success in elite athletes? Explicit and implicit motor learning in youth elite and non-elite soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 34(18), 1782–1790. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1137344>
- Vernon, D. J. (2005). Can neurofeedback training enhance performance? An evaluation of the evidence with implications for future research. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 30(4), 347–364. <https://doi.org/10.1007/s10484-005-8421-4>
- Vernon, D., Egner, T., Cooper, N., Compton, T., Neilands, C., Sheri, A., & Gruzelier, J. (2003). The effect of training distinct neurofeedback protocols on aspects of cognitive performance. *International journal of psychophysiology : official journal of the International Organization of Psychophysiology*, 47(1), 75–85. [https://doi.org/10.1016/s0167-8760\(02\)00091-0](https://doi.org/10.1016/s0167-8760(02)00091-0)
- Vickers, J. N., & Williams, A. M. (2007). Performing under pressure: The effects of physiological arousal, cognitive anxiety, and gaze control in biathlon. *Journal of Motor Behavior*, 39(5), 381–394. <https://doi.org/10.3200/JMBR.39.5.381-394>
- Vlaeyen, J. W. S., & Linton, S. J. (2000). Fear-avoidance and its consequences in chronic musculoskeletal pain: a state of the art. *Pain*, 85(3), 317–332. [https://doi.org/10.1016/S0304-3959\(99\)00242-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3959(99)00242-0)
- Volgemute, K., Vazne, Z., Krauksta, D., & Cosma, G. A. (2023). The improvement of athletes' imagery ability and physical self-efficacy for the growth of athletic achievements in sport model. *Journal of Physical Education and Sport*, 23(3), 748–755. <https://doi.org/10.7752/jpes.2023.03092>
- Vuillerme, N., Chenu, O., Demongeot, J. *et al.* Controllo della postura mediante un sistema di biofeedback tattile basato sulla pressione plantare e posizionato sulla lingua. *Exp Brain Res* 179, 409–414 (2007). <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0800-4>
- Wagstaff C. R. (2014). Emotion regulation and sport performance. *Journal of sport & exercise psychology*, 36(4), 401–412. <https://doi.org/10.1123/jsep.2013-0257>
- Wagstaff, C. R. D. (2014). Emotion regulation and sport performance. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 36(4), 401–412. <https://doi.org/10.1123/jsep.2013-0257>
- Walker, S. P., & Galhenage, S. D. (2025). The relationship between attention control, emotion regulation and mental toughness among competitive female cricketers. *South African*

journal of sports medicine, 37(1), v37i1a20270.
<https://doi.org/10.17159/2078-516X/2025/v37i1a20270>

- Wan, F., Nan, W., Vai, M. I., & Rosa, A. (2014). Resting alpha activity predicts learning ability in alpha neurofeedback. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 500. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00500>
- Wang, K. P., Cheng, M. Y., Chen, T. T., Huang, C. J., Schack, T., & Hung, T. M. (2020). Elite golfers are characterized by psychomotor refinement in cognitive-motor processes. *Psychology of Sport and Exercise*, 50, 101739. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2020.101739>
- Warburton, D. E., Nicol, C. W., & Bredin, S. S. (2006). Health benefits of physical activity: The evidence. *CMAJ: Canadian Medical Association Journal*, 174(6), 801–809. <https://doi.org/10.1503/cmaj.051351>
- Wareing, L., Readman, M. R., Longo, M. R., Linkenauger, S. A., & Crawford, T. J. (2024). The utility of heartrate and heartrate variability biofeedback for the improvement of interoception across behavioural, physiological and neural outcome measures: a systematic review. *Brain Sciences*, 14(6), 579. <https://doi.org/10.3390/brainsci14060579>
- Weber, E., Köberl, A., Frank, S., & Doppelmayr, M. (2011). Predicting successful learning of SMR neurofeedback in healthy participants: methodological considerations. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 36(1), 37–45. <https://doi.org/10.1007/s10484-010-9142-x>
- Weerdmeester, J., van Rooij, M. M., Engels, R. C., & Granic, I. (2020). An integrative model for the effectiveness of biofeedback interventions for anxiety regulation. *Journal of medical Internet research*, 22(7), e14958. <https://doi.org/10.2196/14958>
- Weinberg, R. S., & Gould, D. (2015). *Foundations of sport and exercise psychology* (7th ed.). Human Kinetics.
- Weiß, M., Büttner, M., & Richlan, F. (2024). The Role of Sport Psychology in Injury Prevention and Rehabilitation in Junior Athletes. *Behavioral sciences*, 14(3), 254. <https://doi.org/10.3390/bs14030254>
- Weiß, T., & Engel, B. T. (1971). Operant conditioning of heart rate in patients with premature ventricular contractions. *Biopsychosocial Science and Medicine*, 33(4), 301–322.
- Weiß, M. R., Kipp, L. E., & Bolter, N. D. (2012). Training for life: Optimizing positive youth development through sport and physical activity. In S. M. Murphy (Ed.), *The Oxford handbook of sport and performance psychology* (pp. 448–475). Oxford University Press.
- Welford, W. T., Brebner, J. M., & Kirby, N. (1980). *Reaction times*. Stanford University.
- Wesch, N., Hall, C., Prapavessis, H., Maddison, R., Bassett, S., Foley, L., Brooks, S., & Forwell, L. (2012). Self-efficacy, imagery use, and adherence during injury rehabilitation.

- Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 22(5), 695–703. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2011.01304.x>
- Wiese-Bjornstal, D. M., Smith, A. M., Shaffer, S. M., & Morrey, M. A. (1998). An integrated model of response to sport injury: Psychological and sociological dynamics. *Journal of Applied Sport Psychology*, 10(1), 46–69. <https://doi.org/10.1080/10413209808406377>
- Wise, R. A. (2004). Dopamine, learning and motivation. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 483–494. <https://doi.org/10.1038/nrn1406>
- Witte, M., Kober, S. E., Ninaus, M., Neuper, C., & Wood, G. (2013). Control beliefs can predict the ability to up-regulate sensorimotor rhythm during neurofeedback training. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 478. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00478>
- Xiang, M. Q., Hou, X. H., Liao, B. G., Liao, J. W., & Hu, M. (2018). The effect of neurofeedback training for sport performance in athletes: A meta-analysis. *Psychology of Sport and Exercise*, 36, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2018.02.004>
- Yalfani, A., & Ahmadi, M. (2024). Effect of neurofeedback training on psychological features and plantar pressure distribution symmetry in patients with patellofemoral pain: A randomized controlled trial. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2024.04.026>
- Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18(5), 459–482. <https://doi.org/10.1002/cne.920180503>
- Yılmaz, E., Aktop, A., Abdioğlu, A. *et al.* L'effetto del biofeedback della variabilità della frequenza cardiaca sul recupero dopo l'esercizio aerobico. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 50, 95–106 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10484-024-09672-z>
- Yucha, C., & Montgomery, D. (2008). *Evidence-based practice in biofeedback and neurofeedback*. AAPB.
- Zaccaro, A., Piarulli, A., Laurino, M., Garbella, E., Menicucci, D., Neri, B., & Gemignani, A. (2018). How breath-control can change your life: a systematic review on psycho-physiological correlates of slow breathing. *Frontiers in human neuroscience*, 12, 409421. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00353>
- Zaichkowsky, L. D., & Naylor, A. H. (2004). Arousal in sport. *Encyclopedia of applied psychology*, 1, 155-161.
- Zeeman, E. C. (1976). Catastrophe theory. *Scientific American*, 234(4), 65–83. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0476-65>
- Zhang, X., Chang, Z., Zhao, S., & Ning, Z. (2025). The effects of biofeedback training on athletes' mental health and performance: A systematic review and Bayesian meta-analysis. *Frontiers in Psychology*, 16, 1662868. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1662868>

- Zhang, Z., Wu, H., Wang, W., & Wang, B. (2010). A smartphone based respiratory biofeedback system. In *2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics* (pp. 717–720). IEEE. <https://doi.org/10.1109/BMEI.2010.5640072>
- Zhao, Y., & Zhang, H. (2025). The inverted-U relationship between stress and performance in elite shooting. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-29230-9>
- Zizzi, S. J., Deaner, H. R., & Hirschhorn, D. K. (2003). The relationship between emotional intelligence and performance among college basketball players. *Journal of Applied Sport Psychology*, 15(3), 262–269. <https://doi.org/10.1080/10413200305390>
- Zoefel, B., Huster, R. J., & Herrmann, C. S. (2011). Neurofeedback training of the upper alpha frequency band in EEG improves cognitive performance. *NeuroImage*, 54(2), 1427–1431. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.08.078>
- Zotov, V., Phillips, R., Young, K. D., Drevets, W. C., & Bodurka, J. (2013). Prefrontal control of the amygdala during real-time fMRI neurofeedback training of emotion regulation. *PLoS ONE*, 8(11), e79184. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079184>

* = opere non direttamente consultate

