



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PAVIA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE DEL SISTEMA NERVOSO E
DEL COMPORTAMENTO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN PSICOLOGIA

**Efficacia del biofeedback negli sport di racchetta: una
revisione sistematica**

RELATORE:

Prof.ssa Elena Cavallini

CORRELATORE:

Dott.ssa Federica Salmaso

Tesi di Laurea di
Emanuele Cusimano
Matricola N. 562544

Anno Accademico 2025/2026

INDICE

ABSTRACT	5
ABSTRACT	7
Capitolo 1 – Le tecniche di psicologia dello sport: panoramica generale.....	9
1.1 Lo sviluppo storico della psicologia dello sport	9
1.2 Il <i>mental training</i>	10
1.3 Principali tecniche di <i>mental training</i>	11
1.3.1 <i>Self-talk</i>	11
1.3.2 <i>Goal setting</i>	12
1.3.3 <i>Mindfulness</i> e tecniche di consapevolezza.....	14
1.3.4 <i>Imagery</i> o visualizzazione mentale	15
1.3.5 Tecniche di rilassamento e regolazione dell' <i>'arousal</i>	16
1.3.6 <i>Routine pre-performance</i>	17
1.3.7 Introduzione su <i>biofeedback</i> e <i>neurofeedback</i>	18
Capitolo 2 – <i>Biofeedback, neurofeedback</i> e sport di racchetta	20
2.1 Finalità del capitolo	20
2.2 Il <i>biofeedback</i>	20
2.2.1 Definizione dello strumento	20
2.2.2 Principio psicofisiologico di funzionamento	21
2.2.3 Segnali fisiologici principali: HRV e sEMG	21
2.2.4 Applicazione in ambito sportivo.....	22
2.3 Il <i>Neurofeedback</i>	25
2.3.1 Definizione.....	25
2.3.2 Funzionamento e basi neurofisiologiche dello strumento	25
2.3.3 L'elettroencefalogramma (EEG).....	26
2.3.4 Effetti dello strumento.....	27
2.4 Modelli di classificazioni delle discipline sportive	28
2.4.1 Distinzione tra sport <i>open</i> -e <i>closed-skill</i> come concetto teorico generale.....	28
2.4.2 Gli sport di racchetta come attività prevalentemente <i>open-skill</i>	29
2.4.3 Richieste degli sport di racchetta e relativi benefici sulla salute	30
2.5 Specificità dei principali sport di racchetta.....	32
2.5.1 Tennis.....	33
2.5.2 Tennistavolo	35
2.5.3 Badminton	36
2.5.4 Squash.....	37
2.5.5 Padel.....	37
2.6 Stato dell'arte e obiettivi.....	39
Capitolo 3 - Materiali e metodi della ricerca.....	42

3.1 Obiettivo della ricerca	42
3.2 Strategia di ricerca	42
3.2.1 Database e interfacce consultate	42
3.2.2 Stringhe di ricerca	43
3.3 Criteri di inclusione e di esclusione	43
3.3.1 Criteri di inclusione	43
3.3.2 Criteri di esclusione	43
3.4 Selezione degli studi	44
3.4.1 Procedura di <i>screening</i>	44
3.4.2 PRISMA <i>flow diagram</i>	44
3.5 Estrazione dei dati	46
3.6 Risultati	46
3.6.1 Aspetti metodologici	51
3.6.2 Caratteristiche dei campioni	52
3.6.3 Variabili e costrutti indagati	53
3.6.4 Interventi con <i>biofeedback</i> come tecnica singola	54
3.6.5 Interventi di <i>biofeedback</i> combinato ad altri metodi psicologici	64
3.6.6 Biofeedback come strumento di misurazione (non di intervento)	71
Capitolo 4 – Discussione e conclusione	74
4.1 Sintesi dei risultati principali	74
4.2 Biofeedback come strumento di autoregolazione psicofisiologica	75
4.3 Il contributo dell'elettromiografia (EMG) nell'ambito neuromuscolare	76
4.4 Integrazione del <i>biofeedback</i> con altre tecniche psicologiche	76
4.5 Limiti della letteratura esaminata	77
4.6 Implicazioni pratiche e direzioni future di ricerca	79
4.7 Conclusioni	80
Bibliografia	81

ABSTRACT

Introduzione e obiettivi. Il *biofeedback* e il *neurofeedback* sono tecniche di autoregolazione che permettono all'atleta di monitorare e modulare volontariamente parametri fisiologici o neurofisiologici altrimenti non percepibili, con l'obiettivo di migliorare il controllo di stati psicofisiologici rilevanti per la prestazione sportiva. Nonostante la letteratura abbia già indagato l'efficacia di queste tecniche nello sport in generale, la popolazione atletica è stata finora trattata come un gruppo sostanzialmente omogeneo, senza distinguere in modo sistematico tra discipline con caratteristiche motorie e percettive differenti. Gli sport di racchetta: tennis, tennistavolo, badminton, squash e padel, condividono richieste tecniche, percettive e psicologiche specifiche che li rendono un ambito potenzialmente rilevante per l'applicazione di queste tecniche, ma che risulta a oggi privo di una trattazione sistematica autonoma.

Metodi. Il presente lavoro ha come obiettivo quello di condurre una revisione sistematica della letteratura sull'uso del *biofeedback* e del *neurofeedback* applicati agli sport di racchetta. La revisione è stata condotta secondo le linee guida PRISMA e il protocollo è stato registrato preventivamente su *Open Science Framework*. La ricerca bibliografica è stata effettuata su tre database (Scopus, PubMed, EBSCOhost), utilizzando stringhe di ricerca costruite sull'incrocio dei termini "*biofeedback*" e "*neurofeedback*" con i nomi delle discipline di racchetta considerate. Sono stati inclusi studi condotti su atleti sani praticanti sport di racchetta e che impiegassero interventi di *biofeedback* e/o *neurofeedback*, mentre sono stati oggetto di esclusione, articoli non in lingua inglese, studi con analisi bayesiane e articoli ritirati. Il processo di selezione, condotto da due valutatori indipendenti in doppio cieco, ha portato all'identificazione di 42 *record*, ridotti a 9 studi eleggibili dopo la rimozione dei duplicati e la valutazione di titolo, *abstract* e testo integrale.

Risultati. Contrariamente alle attese, nessuno dei 9 studi inclusi ha impiegato un intervento di *neurofeedback*, nonostante questo fosse esplicitamente previsto tra i criteri di inclusione: tutti gli studi selezionati hanno riguardato esclusivamente interventi di *biofeedback*. Gli studi inclusi sono stati organizzati in quattro filoni tematici: un primo gruppo ha utilizzato il *biofeedback* psicofisiologico, basato su variabilità della frequenza cardiaca o risposta galvanica della pelle, come intervento singolo; un secondo gruppo ha impiegato il *biofeedback* elettromiografico a supporto dell'allenamento neuromuscolare; un terzo gruppo ha combinato il *biofeedback* con altre tecniche psicologiche, quali la ristrutturazione cognitiva, il *mental training* e la *mindfulness*; un quarto studio, infine, ha utilizzato il *biofeedback* non come intervento ma come strumento di misurazione all'interno di un disegno correlazionale. Nel complesso, la letteratura disponibile suggerisce un potenziale interesse del *biofeedback* per l'allenamento psicofisiologico e tecnico negli sport di racchetta, ma resta un ambito di ricerca ancora limitato, caratterizzato da campioni ridotti, disegni sperimentali

eterogenei e assenza di dati di *follow-up*. L'assenza di studi di *neurofeedback* eleggibili rappresenta inoltre una lacuna specifica rispetto ad altre discipline sportive, e costituisce un'indicazione rilevante per la ricerca futura in questo ambito.

ABSTRACT

Introduction and objectives. Biofeedback and neurofeedback are self-regulation techniques that allow athletes to monitor and voluntarily modulate physiological or neurophysiological parameters that would otherwise remain outside conscious perception, with the aim of improving control over psychophysiological states relevant to sport performance. Although existing literature has investigated the efficacy of these techniques in sports generally, the athletic population has thus far been treated as a largely homogeneous group, without systematically distinguishing between disciplines characterized by different motor and perceptual demands. Racket sports, such as tennis, table tennis, badminton, squash, and padel, share specific technical, perceptual, and psychological requirements that make them a potentially significant area for the application of these techniques, yet they currently lack a dedicated, systematic analysis.

Methods. The aim of the present work is to conduct a systematic review of the literature on the use of biofeedback and neurofeedback in racket sports. The review was conducted in accordance with PRISMA guidelines, and the protocol was registered in advance on the Open Science Framework. A literature search was performed across three databases (Scopus, PubMed, EBSCOhost) using search strings combining the terms “biofeedback” and “neurofeedback” with the names of the specific racket sports under consideration. Studies involving healthy racket-sport athletes and interventions using biofeedback and/or neurofeedback were included, whereas non-English articles, studies employing Bayesian analysis, and retracted articles were excluded. The selection process, carried out by two independent, blinded reviewers, identified 42 records; this number was reduced to 9 eligible studies following the removal of duplicates and the screening of titles, abstracts, and full texts.

Results. Contrary to expectations, none of the nine included studies employed a neurofeedback intervention, even though this was explicitly listed among the inclusion criteria; all selected studies focused exclusively on biofeedback interventions. The included studies were organized into four thematic categories: a first group used psychophysiological biofeedback, based on heart rate variability or galvanic skin response, as a standalone intervention; a second group employed electromyographic biofeedback to support neuromuscular training; a third group combined biofeedback with other psychological techniques, such as cognitive restructuring, mental training, and mindfulness; and a fourth study used biofeedback not as an intervention but as a measurement tool within a correlational design. Overall, the available literature suggests that biofeedback holds potential for psychophysiological and technical training in racket sports; however, it remains a limited area of research characterized by small sample sizes, heterogeneous experimental designs, and a lack of follow-up data. Furthermore, the absence of eligible neurofeedback studies represents a specific

gap compared to other sports disciplines and offers a significant pointer for future research in this field.

Capitolo 1 – Le tecniche di psicologia dello sport: panoramica generale

1.1 Lo sviluppo storico della psicologia dello sport

L'interesse per la dimensione psicologica della prestazione sportiva precede di gran lunga la nascita della psicologia dello sport come disciplina autonoma. Nell'antica Grecia, con l'avvio dei Giochi Olimpici attorno al 776 a.C., la preparazione degli atleti integrava la dimensione mentale a quella fisica, attraverso un sistema nominato: "*tetrade*", basato su preparazione, concentrazione, moderazione e rilassamento (Gould & Voelker, 2014). I primi contributi propriamente scientifici emergono nella seconda metà dell'Ottocento, in un contesto caratterizzato dalla nascita della psicologia sperimentale, dal laboratorio fondato da Wilhelm Wundt a Lipsia nel 1879 e da alcuni studi pionieristici su ipnosi, affaticamento mentale e tempi di reazione applicati alla prestazione fisica (Gould & Voelker, 2014; Lochbaum *et al.*, 2022). Significativo è lo studio di Norman Triplett che, nel 1898, conduce quello che è considerato il primo esperimento a coniugare psicologia dello sport e psicologia sociale, dimostrando l'influenza della presenza altrui sulla prestazione ciclistica (Gould & Voelker, 2014; Lochbaum *et al.*, 2022). Una figura rilevante in questa fase sarà Pierre de Coubertin, fondatore del movimento olimpico moderno, che nel 1900 utilizza per primo l'espressione "*psicologia dello sport*" nel saggio *La Psychologie du Sport* e organizza diversi congressi olimpici dedicati proprio agli aspetti psicologici della pratica sportiva (Gould & Voelker, 2014; Lochbaum *et al.*, 2022). Tra il 1920 e il 1930 la disciplina inizia a strutturarsi come specialità autonoma: In Germania, Robert Werner Schulte; in Unione Sovietica, Piotr Roudik e Avksenty Puni; Negli Stati Uniti, Coleman Griffith (Gould & Voelker, 2014). Tra gli anni Quaranta e Sessanta si consolidano le basi per l'istituzionalizzazione accademica del campo: Franklin Henry, a Berkeley, forma una generazione di ricercatori che indagano sistematicamente temi come la personalità dell'atleta e la relazione tra *arousal* e prestazione (Gould & Voelker, 2014). Sul versante applicativo, David Tracy lavora con squadre professionistiche di baseball utilizzando rilassamento, tecniche di costruzione della fiducia e autosuggestione, mentre Dorothy Hazeltine Yates, tra le prime figure femminili di rilievo del settore, applica affermazioni positive e rilassamento nel lavoro con pugili universitari, valutando sistematicamente l'efficacia dei propri interventi (Gould & Voelker, 2014). La svolta istituzionale definitiva si colloca nella seconda metà degli anni Sessanta. Il Primo Congresso Mondiale di Psicologia dello Sport, tenutosi a Roma nel 1965, segna la nascita della *International Society of Sport Psychology* (ISSP), con Ferruccio Antonelli come primo presidente; cinque anni dopo viene pubblicato il primo numero dell'*International Journal of Sport Psychology* (Gould & Voelker, 2014). Dopo questa inizieranno a nascere ulteriori società nazionali (Nord America 1966, Gran Bretagna e Francia 1967...) e, nel 1969, la *European Federation of Sport Psychology* (FEPSAC) (Gould &

Voelker, 2014). Tra gli anni Settanta e Novanta la disciplina matura sia sul piano scientifico sia su quello professionale, il Comitato Olimpico statunitense istituisce un proprio comitato consultivo di psicologia dello sport, nascono riviste come *Journal of Sport Psychology* (1979) e *Journal of Applied Sport Psychology* (1989), e l'*American Psychological Association* crea nel 1986 una divisione specificamente dedicata (Gould & Voelker, 2014; Lochbaum *et al.*, 2022). Dagli anni Duemila a oggi la psicologia dello sport è una disciplina pienamente affermata, a livello sia accademico sia professionale. Il volume della produzione scientifica è cresciuto in modo consistente: solo per citare alcuni dati, ricerche bibliometriche condotte nel 2021 hanno individuato oltre 1400 pubblicazioni su *goal setting* e sport dal 1985, oltre 5300 su fiducia dal 1961 e oltre 3400 su ansia e sport dal 1980 (Lochbaum *et al.*, 2022). Parallelamente, si è progressivamente affermato un ampliamento degli obiettivi della disciplina: se l'aspirazione storica e ancora di rilievo resta la comprensione di come le tecniche psicologiche possano migliorare la prestazione atletica (Lochbaum *et al.*, 2022), la letteratura più recente sottolinea con insistenza la necessità di superare un'impostazione centrata esclusivamente sulla *performance* e sulla patologia mentale, per abbracciare un modello in cui la salute mentale non coincide con la semplice assenza di disturbo, ma comprende anche la promozione attiva del benessere psicologico, emotivo e sociale dell'atleta (Wang *et al.*, 2025).

1.2 Il *mental training*

All'interno di questo quadro disciplinare, il *mental training* rappresenta l'insieme organizzato delle pratiche dedicate allo sviluppo delle abilità mentali dell'atleta, competenze interne che permettono di gestire i propri stati psicologici in funzione degli obiettivi prestativi e di benessere (Cece *et al.*, 2020). Il concetto base condiviso da atleti e allenatori è che la componente mentale della prestazione debba essere allenata sistematicamente, alla stregua di quella fisica o tecnica (Cece *et al.*, 2020). Sul piano metodologico, il *mental training* si articola generalmente in tre fasi (Cece *et al.*, 2020). Nella prima fase il preparatore mentale (allenatore o psicologo dello sport) effettua una valutazione delle abilità mentali di partenza dell'atleta (Cece *et al.*, 2020). Nella seconda viene proposto un programma di allenamento mentale vero e proprio, articolato in sessioni che possono includere una o più tecniche specifiche, quali il rilassamento, la pratica immaginativa (*imagery*) o approcci di matrice cognitivo-comportamentale (Cece *et al.*, 2020). Nella terza fase, valutazioni parziali e finali permettono di monitorare lo sviluppo e l'effettivo utilizzo delle abilità allenate (Cece *et al.*, 2020). Un principio ritenuto centrale in questo processo è che la preparazione mentale debba essere calibrata sulle richieste specifiche della disciplina sportiva praticata, così come avviene per la preparazione fisica (Cece *et al.*, 2020). Una fotografia piuttosto solida dell'efficacia delle tecniche di psicologia dello sport sulla prestazione viene fornita dalla revisione sistematica condotta da Lochbaum e colleghi

(2022), che ha sintetizzato trenta meta-analisi pubblicate tra il 1983 e il 2021 su sedici costrutti distinti, tra cui *mental practice* o *imagery*, *self-talk*, *goal setting*, *mindfulness*, coesione di squadra, ansia e fiducia. Nel complesso, gli autori confermano che le variabili psicologiche ipotizzate come protettive per la prestazione: coesione, fiducia e *mindfulness*, esercitano un'influenza positiva, mentre le variabili disfunzionali, come ansia cognitiva e depressione, un'influenza negativa, offrendo così un sostegno empirico solido all'utilità del *mental training* come strumento di ottimizzazione della prestazione sportiva (Lochbaum *et al.*, 2022). Approfondendo l'argomento, è presente anche un filone di ricerca più recente che ha iniziato a distinguere sistematicamente gli interventi psicologici anche in funzione del loro impatto sul benessere psicologico dell'atleta, individuando tre famiglie principali: il *psychological skills training* (tecniche come *self-talk*, *imagery*, *goal setting* e regolazione dell'*arousal*, con finalità orientate alla prestazione), gli interventi di "terza onda" (basati su *mindfulness*, accettazione, autocompassione e valori, orientati a modificare la relazione dell'atleta con la propria esperienza interna piuttosto che il contenuto di quest'ultima) e gli interventi di psicologia positiva (centrati sull'incremento di cognizioni, emozioni e comportamenti positivi, come gratitudine e senso di scopo) (Wang *et al.*, 2025).

1.3 Principali tecniche di *mental training*

1.3.1 *Self-talk*

Il *self-talk* è la tecnica di *mental training* che riguarda le verbalizzazioni che l'atleta rivolge a sé stesso, in forma manifesta o silenziosa, ed è una delle competenze più studiate in psicologia dello sport (Fritsch *et al.*, 2022). Storicamente il costrutto nasce da un interesse applicativo molto concreto: l'uso di parole-chiave (*cue words*) capaci di orientare l'attenzione dell'atleta durante l'esecuzione motoria, ad esempio nel tennis o nello sci (Hatzigeorgiadis *et al.*, 2011). Da questa origine si è progressivamente consolidata una prima distinzione, tuttora centrale, tra *self-talk* istruzionale, orientato alla tecnica, alla strategia o alle componenti cinestetiche del gesto, e *self-talk* motivazionale, orientato invece ad attivare l'atleta, sostenerne lo sforzo, costruire fiducia o indurre stati d'animo positivi (Hatzigeorgiadis *et al.*, 2011). Una seconda distinzione, più recente e di matrice *dual-process*, ha in parte riorganizzato il campo separando il *self-talk* strategico da quello organico (Fritsch *et al.*, 2022). Il primo corrisponde all'uso intenzionale di parole-chiave predeterminate, scelte dall'atleta o dal preparatore prima della prestazione con la finalità dichiarata di migliorare l'apprendimento e la prestazione; il secondo si riferisce invece ai pensieri verbalizzati spontaneamente dall'atleta prima, durante e dopo l'attività sportiva, e si compone in sotto parti a sua volta: *self-talk* spontaneo, non

intenzionale, reattivo a uno stimolo del contesto, e *self-talk goal-directed*, ovvero utilizzato intenzionalmente per progredire verso un obiettivo o risolvere un problema (Fritsch *et al.*, 2022).

Sul piano dell'efficacia sulla prestazione motoria, il *self-talk* strategico mostra un effetto positivo di entità moderata, ma tale efficacia non è costante: varia in funzione di alcuni fattori moderatori identificabili. Il primo è la natura del compito: la tecnica risulta più efficace nei compiti che richiedono abilità motorie fini, rispetto a quelli che richiedono abilità motorie grossolane (Hatzigeorgiadis *et al.*, 2011). Su questa base trova un supporto anche l'ipotesi del *matching*, secondo cui il *self-talk* istruzionale sarebbe più indicato per i compiti di precisione (abilità motorie fini) e quello motivazionale per i compiti di forza e resistenza (abilità motorie grossolane) (Hatzigeorgiadis *et al.*, 2011). Un secondo moderatore è la novità del compito, con un effetto tendenzialmente maggiore nei compiti non ancora appresi rispetto a quelli già consolidati, sebbene l'effetto rimanga significativo anche in questi ultimi (Hatzigeorgiadis *et al.*, 2011). Il fattore che mostra l'impatto più netto è la presenza di un training specifico sull'uso della tecnica, di fatti, gli interventi che includono una fase di allenamento al *self-talk* producono effetti superiori rispetto a una sua semplice istruzione occasionale, a conferma del fatto che il *self-talk*, come le altre abilità psicologiche di base, richiede un apprendimento strutturato per essere realmente efficace (Hatzigeorgiadis *et al.*, 2011). Per quanto riguarda il rapporto tra *self-talk* e processi affettivi, laddove il mental training è applicato a popolazioni cliniche piuttosto che ai soli atleti, l'utilizzo di tale tecnica assume caratteristiche diverse. Sul versante organico, la concordanza tra valenza del *self-talk* spontaneo e valenza dello stato affettivo provato è relativamente costante, un dato coerente con le teorie dell'*appraisal* e con le prospettive costruzioniste dell'emozione (Fritsch *et al.*, 2022). Il *self-talk goal-directed* viene invece impiegato dagli atleti con diverse funzioni di regolazione emotiva (motivazionale, istruzionale, di controllo dell'attivazione) nonostante le evidenze disponibili non permettano ancora di trarre conclusioni definitive sulla sua reale efficacia in tal senso (Fritsch *et al.*, 2022). Sul versante strategico, infine, gli studi di intervento restano limitati e concentrati quasi esclusivamente sulla regolazione dell'ansia, con risultati misti: alcuni protocolli producono una riduzione dell'ansia cognitiva, altri della sola componente somatica, senza un pattern coerente tra gli studi (Fritsch *et al.*, 2022). Nel complesso, dunque, il *self-talk* è una tecnica dotata di solide evidenze di efficacia sulla prestazione motoria, ma ancora parzialmente esplorata per quanto riguarda il suo impatto sui processi affettivi e sulla regolazione emotiva (Hatzigeorgiadis *et al.*, 2011; Fritsch *et al.*, 2022).

1.3.2 Goal setting

Il *goal setting* occupa una posizione di primo piano tra le tecniche di *mental training*, sia per la frequenza con cui viene utilizzato nella pratica sportiva sia per l'ampiezza della letteratura

sperimentale che lo ha indagato a partire dalla metà degli anni Ottanta (Williamson *et al.*, 2024). Il costrutto affonda le proprie radici nella *Goal Setting Theory* (GST) di Locke e Latham, secondo cui la definizione di obiettivi specifici e sufficientemente sfidanti produce livelli di prestazione superiori rispetto a obiettivi vaghi, facili o all'assenza di un obiettivo esplicito (Williamson *et al.*, 2024). Sul piano teorico, la GST individua quattro meccanismi attraverso cui il *goal setting* inciderebbe sulla prestazione: l'orientamento dell'attenzione verso le azioni pertinenti all'obiettivo, l'attivazione energetica dell'individuo, il sostegno alla persistenza nel tempo e la promozione della ricerca di strategie efficaci per il compito (Jeong *et al.*, 2021). A questi si affiancano cinque caratteristiche degli obiettivi ritenute rilevanti sul piano applicativo: difficoltà, specificità, prossimità temporale, fonte (auto-assegnato, assegnato o condiviso) e tipologia e cinque potenziali moderatori dell'efficacia dell'intervento: abilità, *commitment*, *feedback*, complessità del compito e disponibilità di risorse (Jeong *et al.*, 2021). La GST è nata all'interno dell'ambito organizzativo, per poi essere applicata allo sport, contesto dove ha prodotto fin dalle prime sintesi meta-analitiche risultati meno lineari, con un effetto contenuto del *goal setting* sulla prestazione sportiva, motoria e nell'esercizio fisico (Williamson *et al.*, 2024; Jeong *et al.*, 2021). Questa eterogeneità nei risultati e nell'efficacia della tecnica è legata a diversi fattori moderatori. Il primo riguarda la tipologia di obiettivo: gli obiettivi orientati al processo (*process goals*) mostrano l'effetto più ampio sulla prestazione, seguiti dagli obiettivi di *performance*, mentre gli obiettivi di *mastery*, *outcome* ed ego non producono miglioramenti significativi (Williamson *et al.*, 2024). Il secondo riguarda la prossimità temporale: obiettivi a breve termine, o una combinazione di obiettivi a breve e lungo termine, risultano efficaci, mentre i soli obiettivi a lungo termine non mostrano effetti significativi (Williamson *et al.*, 2024). Un dato che si discosta invece dalle previsioni originarie della teoria riguarda la specificità dell'obiettivo, che non discrimina in modo significativo l'entità dell'effetto: obiettivi specifici e non specifici risultano ugualmente efficaci nel migliorare la prestazione (Williamson *et al.*, 2024). Il *goal setting* non incide solo sulla prestazione in senso stretto, ma anche su un insieme di esiti psicologici che dipendono dalla tipologia di obiettivo adottata. Gli obiettivi centrati sul processo tendono a favorire soprattutto l'autoefficacia, l'interesse intrinseco per il compito e la soddisfazione, mentre gli obiettivi di *performance* risultano più associati alla riduzione dell'ansia, all'aumento della fiducia in sé e alla mobilitazione dello sforzo; gli obiettivi orientati al confronto con gli altri (*ego goals*), al contrario, si associano a un peggior profilo psicologico, con livelli di ansia più elevati e un minore coinvolgimento nel compito rispetto agli obiettivi auto-referenziali (Williamson *et al.*, 2024). Un elemento critico per l'applicazione pratica della tecnica riguarda però il divario tra teoria e contesti applicati. Applicata sul campo con atleti reali, però, la GST mostra risultati meno coerenti con le previsioni teoriche (Jeong *et al.*, 2021). Questa discrepanza può derivare sia da limiti metodologici degli studi applicati

(campioni piccoli, mancanza di gruppi di controllo), sia dal contesto sportivo stesso, dove il *feedback* è spesso già insito nella prestazione e la motivazione degli atleti è tipicamente più alta rispetto al laboratorio (Jeong *et al.*, 2021). Proprio il *feedback*, è l'elemento più consistentemente associato all'efficacia dell'intervento: la presenza di un *feedback* strutturato sui progressi verso l'obiettivo risulta utile per orientare lo sforzo e la scelta di strategie funzionali al raggiungimento del traguardo prefissato (Jeong *et al.*, 2021). Nel complesso, le evidenze disponibili riconoscono al *goal setting* un ruolo utile all'interno del *mental training*, suggerendo però cautela rispetto a un'applicazione rigida e uniforme dei suoi principi, e orientando la ricerca più recente verso approcci personalizzati piuttosto che verso protocolli standardizzati (Williamson *et al.*, 2024; Jeong *et al.*, 2021).

1.3.3 *Mindfulness* e tecniche di consapevolezza

Diversamente dalle tecniche riconducibili al *psychological skills training* (PST), *self-talk*, *goal setting*, regolazione dell'*arousal*, che perseguono il controllo attivo degli stati interni per costruire uno stato mentale funzionale alla prestazione, la *mindfulness* si fonda su un principio opposto: l'attenzione intenzionale e non giudicante all'esperienza presente, senza il tentativo di modificarla (Wang *et al.*, 2026). Questa differenza non è solo terminologica. Il tentativo di sopprimere o controllare pensieri ed emozioni negative può, in alcuni casi, amplificarne l'effetto disturbante, sostituendo comportamenti orientati all'obiettivo con un'eccessiva attività di monitoraggio cognitivo (Wang, Lei & Fan, 2023). La *mindfulness* nasce in parte come risposta a questo limite affiancando gli approcci psicologici tradizionali (Wang, Lei & Fan, 2023). Il meccanismo con cui la *mindfulness* inciderebbe sulla prestazione motoria non è prettamente psicologico (Wang *et al.*, 2026). Sul piano neurobiologico, la pratica sembra modificare la connettività funzionale e lo spessore corticale di aree come la corteccia prefrontale e il cingolo anteriore, coinvolte nel controllo esecutivo, nella regolazione emotiva e nell'attenzione (Wang *et al.*, 2026). Poiché queste stesse regioni intervengono anche nella pianificazione motoria, un potenziamento della loro funzionalità potrebbe tradursi in un miglior controllo *top-down* sulla corteccia motoria, con benefici sulla coerenza tra pianificazione ed esecuzione del gesto sportivo (Wang *et al.*, 2026). In psicologia dello sport questo principio ha dato origine a diversi protocolli applicativi: *Mindfulness Meditation Training for Sport* (MMTS), *Mindful Sport Performance Enhancement* (MSPE), *Mindfulness-Acceptance-Commitment* (MAC), *Mindfulness-Acceptance-Insight-Commitment* (MAIC) che nonostante si differenzino nei contenuti condividono l'impianto teorico di base (Wang *et al.*, 2026). L'efficacia della *mindfulness* sulla prestazione sport specifica appare nel complesso positiva ma non uniforme (Wang *et al.*, 2026). I benefici più solidi si osservano quando la pratica è protratta nel tempo e integra una componente di allenamento autonomo (*home practice*) (Wang *et al.*, 2026). la *mindfulness*, quindi, sembrerebbe

funzionare più come una capacità che si costruisce per accumulo di pratica e allenamento che come uno strumento a effetto immediato (Wang *et al.*, 2026). Coerentemente, gli interventi brevi o di sessione singola mostrano effetti più deboli e meno affidabili (Wang *et al.*, 2026; Wang, Lei & Fan, 2023). L'effetto della *mindfulness* non è omogeneo: mentre le componenti psicologiche di accettazione, autocompassione, flessibilità psicologica, flow risultano consistentemente migliorate dagli interventi, l'impatto su indicatori più generali di salute mentale resta incerto, probabilmente perché gli atleti coinvolti negli studi disponibili non costituiscono, nella maggior parte dei casi, popolazioni cliniche con sintomatologia significativa al basale (Wang, Lei & Fan, 2023). Un aspetto rilevante, per la comprensione della tecnica, riguarda la distinzione tra pratica di *mindfulness* protratta nel tempo e *mindfulness induction* (MI), ovvero un singolo episodio di pratica, tipicamente di breve durata, volto a indurre uno stato temporaneo di consapevolezza piuttosto che una disposizione stabile (Nien *et al.*, 2023). Anche una MI di durata contenuta, caratterizzata tipicamente in respirazione focalizzata, meditazione consapevole e *body scan* è in grado di ridurre l'ansia di stato e l'affettività negativa, e si accompagna a un aumento della potenza *theta* frontale, un correlato elettrofisiologico associato a un maggiore controllo attentivo e a un'autoregolazione cognitivamente costosa (*effortful*) piuttosto che a un rilassamento passivo (Nien *et al.*, 2023). Questo dato è importante perché mostra come la *mindfulness*, anche nella sua forma più breve, non equivalga a un semplice stato di quiete, ma implichi un lavoro attivo di orientamento e ri-orientamento dell'attenzione al momento presente (Nien *et al.*, 2023).

1.3.4 Imagery o visualizzazione mentale

L'*imagery*, o pratica immaginativa, consiste nella creazione o ricreazione volontaria di un'esperienza a partire da informazioni mnestiche, dotata di caratteristiche quasi-percettive, quasi-sensoriali e quasi-affettive, pur in assenza dello stimolo reale a cui l'esperienza fa riferimento (Simonsmeier *et al.*, 2020). È una delle tecniche di *mental training* più diffuse in psicologia dello sport, impiegata sia come strategia autonoma sia come componente all'interno di interventi più articolati, incluse le *routine pre-performance* che approfondiremo più avanti (Simonsmeier *et al.*, 2020). Sul piano concettuale è importante distinguere l'*imagery* dalla più generica *mental practice* composta da processi eterogenei, come il *self-talk* o il rilassamento, mentre l'*imagery* rappresenta più specificamente il processo di rappresentazione mentale di un'esperienza, che può a sua volta essere oggetto di pratica ripetuta (Simonsmeier *et al.*, 2020). La letteratura distingue diverse tipologie di contenuto immaginativo, a seconda che l'atleta immagini l'esecuzione tecnica di un'abilità, una strategia di gioco, il raggiungimento di un obiettivo, stati di *arousal* e affettività, oppure cognizioni quali la fiducia in sé e la tenacia mentale (Simonsmeier *et al.*, 2020). A questa classificazione per

contenuto si affiancano ulteriori variazioni nell'implementazione: la prospettiva da cui l'immagine viene generata può essere interna, quando l'atleta si immagina di vivere l'azione in prima persona, oppure esterna, quando si osserva come farebbe uno spettatore; la modalità sensoriale coinvolta può essere prevalentemente visiva, cinestetica, o una combinazione delle due; l'immagine può inoltre essere guidata da uno *script* predisposto dal preparatore mentale oppure costruita individualmente dall'atleta, e può essere temporalmente equivalente al gesto reale o discostarsene (Simonsmeier *et al.*, 2020). L'*imagery* viene generalmente vista non come sostituto ma come tecnica utile da affiancare l'allenamento fisico: la combinazione tra pratica immaginativa e pratica motoria reale è la modalità applicativa più diffusa, sul presupposto che i due processi condividano in parte i medesimi substrati neurali pur senza sovrapporsi completamente, potendo quindi fornire contributi differenziali all'apprendimento e alla prestazione (Simonsmeier *et al.*, 2020). L'efficacia della tecnica, inoltre, non sembra limitata al solo miglioramento della prestazione motoria: la pratica immaginativa viene impiegata anche per agire su esiti motivazionali e affettivi, un ampliamento che riflette il riconoscimento, ormai consolidato in psicologia dello sport, del ruolo dell'*imagery* come strumento trasversale di regolazione psicologica, oltre che di apprendimento motorio (Simonsmeier *et al.*, 2020).

1.3.5 Tecniche di rilassamento e regolazione dell'*arousal*

Le tecniche di rilassamento costituiscono una delle abilità psicologiche di base più classicamente insegnate agli atleti, al pari di *goal setting*, *imagery* e *self-talk*, per la gestione dell'ansia quotidiana e competitiva (Kudlackova, Eccles & Dieffenbach, 2013). Concettualmente si distinguono in due famiglie: le tecniche mentali, che perseguono il rilassamento agendo sul pensiero - *imagery*, meditazione - e le tecniche fisiche, che lo perseguono agendo su un parametro corporeo - respirazione, tensione muscolare (Kudlackova *et al.*, 2013). Le tecniche a prevalenza fisica risultano più frequentemente impiegate per fronteggiare l'ansia acuta legata alla competizione, mentre quelle a prevalenza mentale vengono utilizzate più spesso per gestire l'ansia diffusa e cronica associata all'essere atleta, un pattern coerente con la cosiddetta *matching hypothesis*, secondo cui le tecniche fisiche sarebbero più efficaci sulle risposte somatiche allo *stress* e quelle mentali sulle risposte cognitive (Kudlackova *et al.*, 2013). Il rilassamento, inoltre, non serve solo a contenere l'ansia: viene impiegato dagli atleti anche come strumento di recupero psicofisico dopo l'allenamento o la gara, una funzione distinta dalla mera riduzione dell'attivazione pre-competitiva (Kudlackova *et al.*, 2013). Tra le tecniche di rilassamento fisico, il rilassamento muscolare progressivo (*progressive relaxation training*, PRT), noto anche come rilassamento di *Jacobson*, è probabilmente quella più strutturata e replicabile: si fonda su cicli sistematici di contrazione e rilassamento dei principali gruppi muscolari, condotti secondo una sequenza codificata che procede dagli arti superiori al tronco fino agli arti

inferiori (Liang *et al.*, 2021). L'assunto di fondo è che l'apprendimento di un controllo volontario sulla tensione muscolare permetta all'atleta di riconoscere più precocemente i segnali somatici dell'attivazione ansiosa e di intervenire su di essi prima che portino ad un abbassamento della performance. In linea con questo assunto, la PRT si associa a un incremento della fiducia in sé (*self-confidence*) precompetitiva e a una maggiore probabilità di raggiungere il proprio record personale in gara, sebbene il suo effetto sulle componenti più propriamente cognitive dell'ansia risulti meno consistente (Liang *et al.*, 2021). Un ultimo aspetto utile da comprendere, riguarda il confronto tra rilassamento e *mindfulness* come tecniche di regolazione dello stato psicologico pre-prestativo: un'induzione di rilassamento (respirazione diaframmatica e rilassamento muscolare progressivo) produce riduzioni dell'ansia di stato e dell'affettività negativa comparabili a quelle ottenute con un'induzione di *mindfulness* di pari durata, e si accompagna ad un analogo incremento della potenza *theta* frontale (Nien *et al.*, 2023). Questa sovrapposibilità suggerisce che, almeno in atleti privi di esperienza pregressa in pratiche di regolazione mentale, rilassamento e *mindfulness* possano condividere un meccanismo comune di autoregolazione attentiva, pur derivando da razionali teorici distinti, il primo centrato sulla riduzione diretta dell'attivazione fisiologica, l'altro sull'accettazione non giudicante dell'esperienza presente (Nien *et al.*, 2023).

1.3.6 Routine pre-performance

Le *routine pre-performance* (PPR) rappresentano una categoria concettualmente distinta rispetto alle singole tecniche di *mental training* descritte. Non si tratta di un'abilità psicologica isolata, ma di una sequenza strutturata di pensieri e azioni che l'atleta mette in atto sistematicamente, immediatamente prima dell'esecuzione di un gesto sportivo specifico (Rupprecht *et al.*, 2021). Il carattere sistematico e la rilevanza rispetto al compito sono gli elementi che distinguono la PPR dal comportamento superstizioso, il quale deriva invece dal rinforzo accidentale di un'azione priva di reale funzione strumentale, come indossare un capo considerato "portafortuna" (Rupprecht *et al.*, 2021). Sul piano della composizione, una PPR può assumere due forme: *stand-alone*, quando si fonda su un unico elemento preparatorio, oppure estensiva, quando ne combina diversi all'interno di un'unica sequenza (Rupprecht *et al.*, 2021). Tra gli elementi più comunemente impiegati, ci sono *routine* fisiche (ad esempio il palleggio della palla prima di una battuta al tennis, o i palleggi che precedono un tiro libero nel basket), l'*imagery*, il *self-talk*, tecniche di rilassamento come il respiro profondo, e il *focus* attentivo esterno, ottenuto orientando l'attenzione verso un elemento rilevante dell'ambiente o verso una parola-chiave (Rupprecht *et al.*, 2021). A queste si affiancano due elementi più recenti e meno convenzionali: la contrazione dinamica della mano sinistra (*left-hand dynamic handgrip*), che consiste nello stringere ritmicamente il pugno sinistro, o una pallina, per circa trenta-quarantacinque

secondi prima dell'esecuzione, con l'obiettivo di indurre uno stato di ridotta attivazione corticale; e il *quiet eye*, ovvero la fissazione visiva finale e prolungata su un bersaglio specifico (ad esempio il canestro, nel tiro libero) nell'istante immediatamente precedente il gesto, considerato un indicatore di attenzione visiva adattiva orientata al compito (Rupprecht *et al.*, 2021). I meccanismi attraverso cui una PPR eserciterebbe la propria funzione sono molteplici e in parte sovrapponibili a quelli già discussi per le singole tecniche che la compongono: il miglioramento della concentrazione, con l'orientamento dell'attenzione verso indizi rilevanti per il compito e la riduzione di distrazioni interne o esterne; l'incremento dell'autoefficacia e del senso di controllo prima dell'esecuzione; la regolazione discendente dell'ansia pre-competitiva; e la possibilità di pianificare in anticipo la sequenza motoria, consentendo una forma di prova mentale prima dell'esecuzione reale (Rupprecht *et al.*, 2021). Proprio quest'ultima funzione rende la PPR particolarmente rilevante in condizioni di pressione competitiva, dal momento che uno degli obiettivi applicativi più frequenti del suo utilizzo è la prevenzione del calo prestativo indotto dalla pressione, fenomeno noto come *choking* (Rupprecht *et al.*, 2021).

1.3.7 Introduzione su *biofeedback* e *neurofeedback*

Accanto alle tecniche di *mental training* descritte, la letteratura più recente individua in *biofeedback* e *neurofeedback* una categoria di intervento distinta, nonostante condivida con le altre l'obiettivo di sviluppare nell'atleta un controllo volontario sui propri stati psicofisiologici (Blumenstein & Orbach, 2014). A differenziare queste tecniche dalle precedenti non è tanto la finalità, quanto lo strumento: mentre *self-talk*, *imagery*, rilassamento e routine *pre-performance* si fondano su processi cognitivi e comportamentali attivati autonomamente dall'atleta, *biofeedback* e *neurofeedback* si avvalgono di strumentazione elettronica capace di rilevare in tempo reale parametri fisiologici altrimenti non percepibili, e di restituirli sotto forma di segnale visivo o uditivo, rendendo così osservabile e allenabile ciò che normalmente sfugge alla consapevolezza ordinaria (Blumenstein & Orbach, 2014; Zhang *et al.*, 2025). Questa mediazione strumentale consente un livello di precisione e di oggettività nel monitoraggio dello stato interno dell'atleta che le tecniche puramente cognitive non possono offrire, e rappresenta la ragione principale per cui la ricerca ne discute sempre più spesso come ambito a sé stante, con basi teoriche, protocolli e letteratura di riferimento proprie, distinte da quelle del più tradizionale *psychological skills training* (Marzbani *et al.*, 2016; Tosti *et al.*, 2024). Va inoltre sottolineato che, all'interno di questa categoria, il *neurofeedback* si distingue ulteriormente dal *biofeedback* in senso stretto: se quest'ultimo agisce su parametri fisiologici periferici, il *neurofeedback* si rivolge direttamente all'attività elettrica corticale rilevata tramite elettroencefalografia, intervenendo quindi più vicino all'origine cerebrale dei processi che regolano la prestazione, anziché sui loro effetti fisiologici periferici (Blumenstein & Orbach, 2014; Xiang *et*

al., 2018). Per la loro natura tecnica e per l'ampiezza delle basi neurofisiologiche che le sottendono, l'approfondimento di queste due tecniche, viene rimandato al capitolo successivo.

Capitolo 2 – *Biofeedback, neurofeedback* e sport di racchetta

2.1 Finalità del capitolo

Il presente capitolo si propone di delineare un quadro teorico di riferimento che costituisca la base dell'intero elaborato. Il capitolo introduce la tematica partendo dall'analisi del *biofeedback* e del *neurofeedback*, illustrandone le basi teoriche, i meccanismi fisiologici sottostanti e le principali aree di applicazione in ambito sportivo. La seconda parte del capitolo è dedicata all'esame dei criteri con cui la letteratura scientifica classifica le discipline sportive, soffermandosi in particolare sulla distinzione tra sport *open-skill* e *closed-skill* e sul ruolo e sulla posizione che gli sport di racchetta occupano all'interno di questa tassonomia. Vengono successivamente esplorate le caratteristiche cognitive, fisiche e psicologiche che contraddistinguono le principali discipline di racchetta (*i.e.*, tennis, tennistavolo, badminton, squash, padel) insieme ai benefici che la loro pratica può apportare alla salute, con un *focus* specifico sui potenziali effetti dell'utilizzo del *biofeedback* e *neurofeedback* sui diversi *outcome* di queste discipline.

2.2 Il *biofeedback*

2.2.1 Definizione dello strumento

Il *biofeedback* è una tecnica psicofisiologica interdisciplinare, data dall'integrazione di: fisiologia, neuroscienze e psicologia, e che si avvale di strumenti elettronici dotati di elettrodi e sensori per rilevare, monitorare e restituire alla persona informazioni in tempo reale sui propri processi fisiologici sotto forma di segnali uditivi o visivi (Blumenstein & Orbach, 2014; Zhang *et al.*, 2025). L'obiettivo del *biofeedback* è aumentare la consapevolezza dell'individuo rispetto all'effetto che le proprie azioni, pensieri ed emozioni hanno sull'individuo, consentendo lo sviluppo di controllo volontario sui propri processi fisiologici che normalmente sfuggono alla percezione ordinaria dell'individuo (Morgan & Mora, 2017; Paul *et al.*, 2012). Questo processo di presa di consapevolezza, porta l'atleta ad acquisire progressivamente la capacità di raggiungere intenzionalmente stati di rilassamento o di attivazione in funzione delle proprie esigenze di prestazione (Liparoti & Lopez, 2021). È importante distinguere tra *biofeedback* e *biofeedback training*, due concetti spesso utilizzati in modo intercambiabile nella letteratura ma concettualmente distinti (Blumenstein & Orbach, 2014). Il *biofeedback* indica lo strumento e il processo di rilevazione e restituzione delle informazioni psicofisiologiche, il *biofeedback training* designa invece la tecnica di allenamento finalizzata all'acquisizione del controllo volontario dei processi di autoregolazione, attraverso la quale, con una

pratica intensiva, le competenze psicologiche acquisite tendono a diventare risposte automatiche (Blumenstein & Orbach, 2014).

2.2.2 Principio psicofisiologico di funzionamento

Il fondamento teorico del *biofeedback* risiede nel principio psicofisiologico formulato da Green, Green e Walters (1970, come citato in Blumenstein & Orbach, 2014), che postula una relazione bidirezionale tra corpo e mente: le modificazioni fisiologiche si riflettono negli stati mentali ed emotivi, così come questi ultimi, indipendentemente dal fatto che siano consci o inconsci, producono a loro volta variazioni a livello fisiologico. Il *biofeedback*, quindi, può essere considerato un'applicazione della psicofisiologia allo sport e all'esercizio fisico: le variazioni rilevate dai sensori vengono restituite in tempo reale all'atleta attraverso rappresentazioni grafiche su schermo, consentendogli di osservare e regolare i propri stati interni (Blumenstein & Orbach, 2014). Questo processo riflette il principio fondamentale dell'interazione mente-corpo, secondo cui i processi psicologici possono esercitare effetti regolatori sulle funzioni fisiologiche attraverso il sistema nervoso centrale (Zhang *et al.*, 2025). Dal punto di vista neurofisiologico, il meccanismo d'azione più supportato dalla letteratura riguarda il potenziamento dell'omeostasi baroriflessiva (Lehrer & Gevirtz, 2014; Morgan & Mora, 2017). Il barorecettore è un meccanismo riflesso mediato da sensori di pressione localizzati nell'aorta e nell'arteria carotidea: quando la pressione arteriosa aumenta, il riflesso determina una riduzione immediata della frequenza cardiaca, e viceversa (Lehrer & Gevirtz, 2014; Morgan & Mora, 2017). Attraverso questo meccanismo, il *biofeedback* favorisce una sincronizzazione tra il sistema nervoso simpatico e parasimpatico, moderando l'iperattività simpatica e producendo uno stato di regolazione autonoma ottimale (Paul *et al.*, 2012). Un secondo meccanismo proposto riguarda la via afferente vagale: le fibre vagali afferenti proiettano verso aree cerebrali coinvolte nella regolazione emotiva e la respirazione lenta tipica del *biofeedback* HRV potrebbe stimolare questa via, modulando l'attività corticale frontale e riducendo l'*arousal* ansioso (Lehrer & Gevirtz, 2014). Zhang e colleghi (2025) inquadrano questo processo anche nella prospettiva del condizionamento operante, sottolineando come il *biofeedback* rappresenti un processo di apprendimento attraverso cui l'individuo acquisisce un controllo intenzionale sui propri stati corporei attraverso la consapevolezza e la regolazione dei segnali fisiologici.

2.2.3 Segnali fisiologici principali: HRV e sEMG

Per la rilevazione e la restituzione delle informazioni psicofisiologiche, il *biofeedback* si avvale di diverse modalità strumentali, la cui scelta dipende dagli obiettivi dell'intervento e dalle caratteristiche della disciplina sportiva (Blumenstein & Orbach, 2014). Tra i principali segnali fisiologici monitorati

figurano: la tensione muscolare, misurata tramite elettromiografia di superficie (sEMG); l'attività elettrica cerebrale, rilevata tramite elettroencefalografia (EEG), nella sua forma più recente denominata *neurofeedback* (NF); l'attività elettrodermica (EDA), storicamente nota come risposta galvanica della pelle (GSR); la frequenza cardiaca e la sua variabilità (HR/HRV), misurata tramite l'intervallo inter-battito (IBI); la pressione arteriosa; la frequenza respiratoria; e la temperatura cutanea periferica (Blumenstein & Orbach, 2014). Blumenstein e Orbach (2014) sottolineano che la scelta della modalità strumentale più appropriata dipende dalle caratteristiche della disciplina sportiva e dalle sue specifiche richieste competitive. La HRV è definita come la misura della variazione temporale tra un battito cardiaco e il successivo, ed è considerata un marcatore quantitativo della regolazione cardiaca da parte del sistema nervoso autonomo in risposta a stimoli sia fisici sia psicologici (Morgan & Mora, 2017). La sua struttura è complessa e non lineare, caratterizzata dalla sovrapposizione di molteplici frequenze oscillatorie che riflettono il funzionamento di diversi circuiti di regolazione del sistema nervoso autonomo (Lehrer & Gevirtz, 2014). Valori elevati di HRV sono indicativi di una maggiore resilienza fisica ed emotiva dell'individuo; al contrario, una HRV ridotta è associata a compromissione del funzionamento autonomo, minore capacità aerobica e, in ambito sportivo, a possibili stati di *overtraining* (Lehrer & Gevirtz, 2014; Morgan & Mora, 2017). L'elettromiografia di superficie (sEMG) rappresenta una delle modalità *biofeedback* più consolidate, capace di convertire l'attività mioelettrica muscolare in informazioni visive e uditive accessibili all'individuo in tempo reale (Sturma *et al.*, 2018). In ambito sportivo, il sEMG viene impiegato per monitorare e regolare la tensione muscolare durante l'esecuzione del gesto tecnico, fornendo all'atleta informazioni oggettive e in tempo reale sull'attivazione muscolare che altrimenti non sarebbero percepibili (Blumenstein & Orbach, 2014; Sturma *et al.*, 2018).

2.2.4 Applicazione in ambito sportivo

L'applicazione del *biofeedback* in ambito sportivo si caratterizza per un'ampia trasversalità rispetto alle diverse discipline, poiché la scelta della modalità strumentale e delle variabili fisiologiche da monitorare dipende dalle caratteristiche specifiche dello sport e dalle sue richieste competitive (Blumenstein & Orbach, 2014). La letteratura raccolta, ci fa notare l'impiego di questa tecnica in un'ampia varietà di contesti sportivi, come pallacanestro, golf, nuoto, tiro, danza e sport di combattimento, a conferma della sua adattabilità a esigenze prestazionali molto differenti tra loro (Blumenstein & Orbach, 2014; Zhang *et al.*, 2025). L'obiettivo generale dell'applicazione del *biofeedback* in ambito sportivo consiste nel fornire all'atleta la possibilità di riconoscere, valutare e modulare consapevolmente le proprie risposte fisiologiche, così da prevenire o ridurre alterazioni funzionali che potrebbero compromettere la prestazione (Liparoti & Lopez, 2021). Il processo di

apprendimento si sviluppa inizialmente in un contesto controllato, per poi essere trasferito gradualmente dall'allenamento alla competizione, dove l'atleta è chiamato a fronteggiare condizioni di stress e pressione psicologica elevate (Liparoti & Lopez, 2021). Le principali aree applicative del *biofeedback* in ambito sportivo, che verranno approfondite nei paragrafi seguenti, riguardano la gestione dell'attivazione e dell'ansia da prestazione, il controllo della tensione muscolare, il recupero psicofisico e il potenziamento dell'attenzione e della stabilità esecutiva (Blumenstein & Orbach, 2014).

2.2.4.1 Gestione dell'attivazione dell'ansia

In ambito sportivo, una delle applicazioni più documentate del *biofeedback* riguarda la gestione dell'attivazione e dell'ansia da *performance* (Blumenstein & Orbach, 2014). Lo stress agonistico produce tipicamente modificazioni fisiologiche: aumento della frequenza cardiaca, della pressione arteriosa, della tensione muscolare e della frequenza respiratoria; che il *biofeedback training* mira a portare sotto il controllo volontario dell'atleta (Blumenstein & Orbach, 2014). La HRV tende ad abbassarsi in situazioni stressanti e ansiose (Morgan & Mora, 2017). La letteratura documenta effetti positivi del *biofeedback* sulla riduzione dell'ansia e dello stress negli atleti, con miglioramenti nel funzionamento del sistema nervoso autonomo e centrale (Liparoti & Lopez, 2021; Zhang *et al.*, 2025). Promuovendo una maggiore consapevolezza interocettiva e un controllo *top-down* sulla reattività allo stress, il *biofeedback* aiuta gli atleti a passare da strategie di *coping* reattive a strategie proattive, migliorando la resilienza mentale in contesti ad alta pressione competitiva (Zhang *et al.*, 2025).

2.2.4.2 Controllo della tensione muscolare

Il controllo della tensione muscolare rappresenta uno degli ambiti applicativi storicamente più consolidati del *biofeedback* in ambito sportivo, infatti, le prime ricerche sul *biofeedback* nello sport erano focalizzate sulla riduzione dell'ansia di stato e della tensione muscolare, facendo ricorso principalmente al segnale sEMG (Blumenstein & Orbach, 2014). Attraverso la visualizzazione in tempo reale dell'attività mioelettrica, il *biofeedback* sEMG fornisce all'atleta informazioni precise sulle strategie motorie desiderabili e indesiderabili durante l'esecuzione del gesto tecnico, supportando il processo di apprendimento e ottimizzazione motoria (Sturma *et al.*, 2018). Questo aspetto risulta particolarmente rilevante nella prevenzione degli infortuni: l'esecuzione ripetuta e scorretta di un movimento può determinare sovraccarichi muscolari e articolari con rischio di trauma, e il *biofeedback* consente di fornire all'atleta informazioni oggettive in tempo reale sui processi fisiologici in atto durante il movimento (Liparoti & Lopez, 2021). In protocolli strutturati di *biofeedback training*, il controllo della tensione muscolare tramite sEMG viene praticato fin dalle fasi

iniziali del percorso, con l'obiettivo di sviluppare progressivamente la capacità di modulare la tensione muscolare in modo rapido, preciso e autonomo (Blumenstein & Orbach, 2014).

2.2.4.3 Recupero psicofisico

Il *biofeedback* trova applicazione anche nel favorire il recupero psicofisico dell'atleta dopo sessioni di allenamento intensivo o eventi competitivi (Blumenstein & Orbach, 2014). Il *biofeedback training* si compone di due acquisizioni fondamentali: l'apprendimento di tecniche di rilassamento muscolare guidate dal *feedback* fisiologico e lo sviluppo di una capacità di recupero rapida che progressivamente renderà autonoma dallo strumento (Blumenstein & Orbach, 2014). Dal punto di vista fisiologico, la stimolazione parasimpatica indotta dalla respirazione lenta tipica del *biofeedback* HRV produce effetti caratteristici della risposta di rilassamento, contrastando direttamente gli effetti dello stress attraverso il meccanismo definito da Lehrer e Gevirtz (2014) di *antagonismo accentuato*: in condizioni fisiologiche normali, il tono parasimpatico predomina su quello simpatico a riposo, e la stimolazione parasimpatica inibisce l'attivazione simpatica e i suoi effetti, favorendo così il recupero dell'organismo (Lehrer e Gevirtz, 2014).

2.2.4.4 Attenzione e stabilità esecutiva

La gestione dell'attenzione e il mantenimento della stabilità esecutiva in condizioni di stress competitivo rappresentano ulteriori applicazioni del *biofeedback* in ambito sportivo (Blumenstein & Orbach, 2014). Il *biofeedback* supporta il potenziamento dell'efficienza cognitiva, con benefici documentati nel controllo dell'attenzione, nella memoria di lavoro e nella capacità decisionale (Zhang et al., 2025). Paul et al. (2012) sottolineano che pensieri legati alla tensione e alla pressione competitiva compromettono l'attenzione dell'atleta, e che il *biofeedback* aiuta a sviluppare il controllo sulla capacità di concentrarsi su un compito specifico. Morgan e Mora (2017) spiegano che il *biofeedback* HRV sviluppa nell'atleta una maggiore capacità di ridurre le interferenze esterne durante la gara, con effetti positivi documentati sulla concentrazione e sui tempi di reazione. Dal punto di vista neurofisiologico, la pratica del *biofeedback* attiva aree cerebrali coinvolte nella vigilanza e nell'allerta, riducendo contestualmente i pensieri intrusivi e il rimuginio cognitivo (Lehrer & Gevirtz, 2014). Il *neurofeedback*, agendo direttamente sui pattern di attività corticale, risulta particolarmente indicato per gli sport che richiedono elevata precisione e concentrazione sostenuta (Blumenstein & Orbach, 2014; Zhang et al., 2025).

2.3 Il Neurofeedback

Dopo aver esaminato il *biofeedback* nelle sue diverse modalità applicative in ambito sportivo, è opportuno approfondire una delle sue declinazioni anch'essa molto utilizzata nella ricerca sportiva, il *neurofeedback*. Mentre le modalità di *biofeedback* precedentemente descritte si concentrano prevalentemente su parametri fisiologici periferici, quali l'attività muscolare, la frequenza cardiaca o l'attività elettrodermica, esiste una modalità che si rivolge direttamente all'attività elettrica della corteccia cerebrale, rilevata tramite elettroencefalografia (Blumenstein & Orbach, 2014). Questa tecnica, proprio per la sua natura prevalentemente neurofisiologica, viene trattata in letteratura come un ambito a sé stante, con proprie basi teoriche, protocolli di intervento e ambiti applicativi (Marzbani *et al.*, 2016; Tosti *et al.*, 2024).

2.3.1 Definizione

Come anticipato nel paragrafo precedente, il *neurofeedback* rappresenta una forma specializzata di *biofeedback* in cui il segnale restituito al soggetto non riguarda parametri fisiologici periferici, ma l'attività elettrica cerebrale rilevata tramite elettroencefalografia (Blumenstein & Orbach, 2014; Zhang *et al.*, 2025). Si tratta di una tecnica psicofisiologica non invasiva, fondata sui principi del condizionamento operante, che attraverso la misurazione delle onde cerebrali e la restituzione in tempo reale di un *feedback* visivo e uditivo consente al soggetto di acquisire consapevolezza dei propri stati di attivazione cerebrale (Tosti *et al.*, 2024; Marzbani *et al.*, 2016). Nel corso del *training*, il soggetto impara progressivamente a riconoscere la correlazione tra i propri stati mentali e i segnali EEG, sviluppando la capacità di esercitare un controllo volontario sui pattern di attivazione della propria corteccia cerebrale al fine di regolare cognizione, emozioni e comportamenti (Xiang *et al.*, 2018; Marzbani *et al.*, 2016).

2.3.2 Funzionamento e basi neurofisiologiche dello strumento

Durante l'utilizzo in una sessione di *neurofeedback* l'attività elettrica cerebrale dell'atleta viene registrata in continuo tramite EEG, le sue componenti vengono estratte e restituite in tempo reale sotto forma di segnali visivi o uditivi (Marzbani *et al.*, 2016; Xiang *et al.*, 2018). Il soggetto osserva le variazioni del *feedback* e apprende progressivamente a modificare i propri *pattern* cerebrali, sviluppando nel tempo una capacità di autoregolazione volontaria dell'attivazione corticale (Tosti *et al.*, 2024; Xiang *et al.*, 2018). Marzbani e colleghi (2016) distinguono due orientamenti principali nel *training*: uno focalizzato sulle basse frequenze, alpha e theta finalizzato al potenziamento del rilassamento e della concentrazione, e uno orientato alle alte frequenze, *low* beta e beta che portano invece al rinforzo dell'attivazione cognitiva e all'inibizione della distraibilità. I cambiamenti

neurofisiologici indotti dal *training* si fondano sul principio della plasticità cerebrale, che consente modificazioni durature nei *pattern* di attivazione corticale (Tosti *et al.*, 2024). L'attività cerebrale registrata dall'EEG si organizza in cinque bande di frequenza principali, ciascuna associata a specifici stati di attivazione cerebrale. La banda delta (1–4 Hz) è tipicamente associata al sonno profondo e agli stati di incoscienza; la banda theta (4–8 Hz) è collegata a sonnolenza, creatività e stati meditativi, ma anche a distraibilità e ansia; la banda alpha (8–13 Hz) corrisponde a uno stato di veglia rilassata e prontezza; la banda beta (13–30 Hz) è associata al pensiero attivo, alla focalizzazione e all'attenzione sostenuta; infine, la banda gamma (30–100 Hz) è connessa all'elaborazione cognitiva di alto livello e alla risoluzione di problemi (Marzbani *et al.*, 2016; Tosti *et al.*, 2024). Il ritmo SMR (SensoriMotor Rhythm, 12–15 Hz), classificato come *low* beta, corrisponde alla frequenza della corteccia sensomotora e mostra una correlazione inversa con la sua attività: una potenza SMR elevata è pertanto associata a uno stato mentale di elaborazione neurale raffinata durante compiti psicomotori e attentivi, ed è stata collegata a prestazioni superiori in discipline che richiedono precisione motoria (Tosti *et al.*, 2024; Xiang *et al.*, 2018). La banda alpha è invece descritta come indicatore dell'inibizione corticale selettiva: gli atleti esperti mostrano una maggiore potenza alpha nelle regioni temporali, associate a processi irrilevanti al compito, e una minore potenza alpha nelle regioni centrali, legata all'esecuzione motoria, rispetto ai principianti, suggerendo che il *pattern* di attivazione corticale caratteristico dell'*expertise* implichi un'inibizione tempestiva delle aree non pertinenti al compito (Xiang *et al.*, 2018). Il rapporto theta/beta (TBR), che consiste nella soppressione del ritmo theta e nel potenziamento della frequenza beta, è stato associato al controllo attentivo, al processo decisionale e alla riduzione di stati emotivi negativi (Tosti *et al.*, 2024). Il theta frontale mediano (FMT), rilevabile nella regione frontale, è collegato ai processi attentivi *top-down* e alla memoria di lavoro: un incremento di questa componente coincide con una maggiore distribuzione delle risorse attentive e un miglioramento delle funzioni esecutive (Tosti *et al.*, 2024).

2.3.3 L'elettroencefalogramma (EEG)

Tra i diversi segnali utilizzabili per misurare l'attività cerebrale troviamo l'elettroencefalogramma (EEG) che si occupa di registrare l'attività elettrica prodotta dalla sincronizzazione dei neuroni piramidali della corteccia cerebrale attraverso elettrodi posizionati sullo scalpo, generando una traccia di onde cerebrali distinguibili per: frequenza (Hz) e ampiezza (μ V) (Tosti *et al.*, 2024; Marzbani *et al.*, 2016). Il posizionamento degli elettrodi segue il Sistema internazionale 10-20, un metodo standardizzato che consente di correlare i siti di registrazione con le regioni corticali corrispondenti, garantendo comparabilità tra studi e precisione nell'identificazione delle aree *target* (Marzbani *et al.*, 2016). Tra i principali vantaggi dell'EEG abbiamo la non invasività, il costo contenuto e l'elevata

risoluzione temporale; di contro, invece abbiamo, la risoluzione spaziale limitata, rendendo difficile individuare con precisione la fonte dell'attività elettrica, e i segnali possono essere contaminati da movimenti oculari o interferenze elettriche esterne (Tosti *et al.*, 2024; Xiang *et al.*, 2018).

2.3.4 Effetti dello strumento

Sul versante dell'attenzione e della concentrazione, il training mirato alla soppressione del ritmo theta e al potenziamento della banda beta produce un incremento dell'attenzione sostenuta, della capacità di focalizzazione e delle abilità di *problem solving*, mentre la riduzione dell'attività theta contribuisce a diminuire la sonnolenza e la distraibilità (Tosti *et al.*, 2024; Marzbani *et al.*, 2016). Il training del theta frontale mediano, associato alla regione frontale deputata ai processi attentivi top-down, determina inoltre un miglioramento nell'allocazione delle risorse attentive, nella memoria di lavoro e nelle funzioni esecutive (Tosti *et al.*, 2024). Zhang e colleghi (2025) confermano questi risultati, riportando miglioramenti significativi nel controllo attentivo attraverso protocolli che mirano al potenziamento dell'SMR e della banda beta con simultanea soppressione del theta, evidenziando come tali interventi promuovano stati di *arousal* corticale adattivi e riducano l'interferenza cognitiva durante la prestazione. Sul versante dell'autoregolazione dello stato di attivazione, il neurofeedback ha mostrato effetti positivi nella gestione dell'ansia e dello stress competitivo (Marzbani *et al.*, 2016; Tosti *et al.*, 2024). Il *training* della banda alpha favorisce una condizione di veglia rilassata, contribuendo alla riduzione dell'ansia cognitiva e al miglioramento della capacità di gestire lo stress in contesti ad alta pressione (Marzbani *et al.*, 2016; Tosti *et al.*, 2024). Il protocollo alpha-theta, che agisce sulla soglia tra veglia e sonno, è stato associato a un rilassamento profondo e a una maggiore capacità di recupero da stati di tensione emotiva (Marzbani *et al.*, 2016). Più in generale, Xiang e colleghi (2018) sottolineano come il *neurofeedback*, riducendo il controllo cosciente e amplificando l'elaborazione automatica durante l'esecuzione motoria, favorisca quella condizione di fluidità prestativa che caratterizza la performance esperta. Zhang e colleghi (2025) sottolineano che *biofeedback* e *neurofeedback* ottimizzano domini complementari del funzionamento atletico: mentre il *biofeedback* agisce prevalentemente sulla resilienza allo stress e sulla regolazione psicologica attraverso il sistema nervoso autonomo, il neurofeedback potenzia più direttamente l'efficienza neurale nei processi attentivi e nel controllo motorio, configurandosi come uno strumento di intervento più profondo nella catena causale che connette stati cerebrali e prestazione.

2.4 Modelli di classificazioni delle discipline sportive

2.4.1 Distinzione tra sport *open*-e *closed-skill* come concetto teorico generale

Nell'ambito della letteratura delle scienze motorie e della psicologia dello sport, una delle classificazioni più frequentemente utilizzate per descrivere le differenti richieste imposte dalle varie discipline riguarda la distinzione tra sport a abilità aperta (*i.e.*, *open-skill*) e sport ad abilità chiusa (*i.e.*, *closed-skill*). Ogni sport presenta specifiche caratteristiche ambientali e temporali, capaci di influenzare sia l'organizzazione dell'azione motoria sia i processi cognitivi che la sostengono (Heilmann *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023). In generale, gli sport *open-skill* si svolgono in ambienti dinamici, variabili e imprevedibili, nei quali il ritmo dell'azione è fortemente condizionato da stimoli esterni e dal continuo mutare della situazione di gioco (Heilmann *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023). Gli sport *closed-skill*, al contrario, si caratterizzano per condizioni di esecuzione più stabili, prevedibili e maggiormente controllabili dall'atleta (Heilmann *et al.*, 2022; Pancar, 2020; Wang *et al.*, 2023). In questi contesti l'azione tende a essere autogestita e può essere pianificata con un più elevato grado di anticipazione (Wang *et al.*, 2023). Queste differenze ambientali si riflettono sulle richieste cognitive della prestazione. Negli sport *closed-skill* l'azione può essere programmata con maggiore anticipo e si fonda su schemi motori relativamente consolidati (Heilmann *et al.*, 2022; Pancar, 2020). Negli sport *open-skill*, invece, la prestazione dipende dalla capacità di raccogliere rapidamente le informazioni provenienti dall'ambiente, interpretarle e adattare di conseguenza il comportamento motorio alle richieste della situazione (Wang *et al.*, 2023; Heilmann *et al.*, 2022). In queste discipline assumono quindi particolare rilievo processi quali attenzione selettiva, percezione, anticipazione, flessibilità cognitiva e capacità decisionale (Wang *et al.*, 2023; Heilmann *et al.*, 2022). Diversi studi hanno osservato come gli atleti che praticano sport *open-skill* tendano a mostrare prestazioni mediamente superiori, rispetto agli atleti di discipline *closed-skill*, in compiti cognitivi generali che coinvolgono funzioni esecutive e altre abilità cognitive superiori (Wang *et al.*, 2023; Heilmann *et al.*, 2022; Pancar, 2020). Nonostante ciò, Heilmann e colleghi (2022) suggeriscono come la superiorità cognitiva degli atleti *open-skill* non sia un fenomeno uniforme e costante, ma possa essere influenzata da una serie di fattori. Tra questi fattori troviamo il livello di esperienza degli atleti; è possibile, infatti, che differenze significative emergano soprattutto tra atleti altamente allenati, mentre risultino meno evidenti in soggetti con meno esperienza sportiva (Heilmann *et al.*, 2022). Un altro aspetto da prendere in considerazione è l'età; questa variabile può influenzare i risultati in quanto le funzioni cognitive si sviluppano e si modificano nel corso della vita, rendendo i confronti tra gruppi di età diversa meno immediati (Heilmann *et al.*, 2022). Infine, non tutte le funzioni esecutive rispondono alla pratica sportiva; alcune componenti, come la capacità di inibire risposte automatiche non

appropriate o di aggiornare continuamente le informazioni in memoria durante l'azione, sembrano aumentare maggiormente nella pratica di sport *open-skill*, mentre altre abilità cognitive mostrano differenze meno marcate tra le due categorie (Wang *et al.*, 2023; Heilmann *et al.*, 2022; Pancar, 2020). Gli autori concludono, dunque, che una semplice distinzione dicotomica tra sport *open-skill* e *closed-skill* non sia sufficiente per trarre inferenze solide in questo campo, sottolineando la necessità di classificare le discipline sportive in base alle loro specifiche richieste cognitive (Heilmann *et al.*, 2022). Di conseguenza, la distinzione tra sport *open* e *closed-skill* non dovrebbe essere intesa come una separazione rigida e dicotomica, ma piuttosto come uno strumento interpretativo da utilizzare con attenzione. La letteratura suggerisce che le discipline sportive possono essere collocate lungo un *continuum* definito dal grado di prevedibilità ambientale e dall'entità delle richieste cognitive implicate (Wang *et al.*, 2023; Heilmann *et al.*, 2022). Anche all'interno della stessa categoria *open-skill* possono emergere differenze significative in termini di complessità percettiva, esigenze decisionali e necessità di adattamento comportamentale: Wang e colleghi (2023) distinguono, ad esempio, tra sport intercettivi, caratterizzati dall'interazione diretta con un oggetto o un avversario, come nel tennis o nel tennistavolo e sport strategici, come il calcio o la pallavolo, che richiedono l'elaborazione simultanea di informazioni relative a compagni, avversari e posizione in campo (Wang *et al.*, 2023). In questa prospettiva, la classificazione *open-skill* e *closed-skill* rappresenta soprattutto uno strumento teorico utile a comprendere il diverso livello di interazione tra atleta e ambiente e il differente carico di elaborazione cognitiva richiesto dalla prestazione sportiva (Heilmann *et al.*, 2022).

2.4.2 Gli sport di racchetta come attività prevalentemente *open-skill*

All'interno di questo quadro teorico, gli sport di racchetta vengono considerati attività *open-skill* (Heilmann *et al.*, 2022; Pancar, 2020). Durante il gioco, infatti, l'atleta opera in un ambiente esternamente regolato e in continuo cambiamento, si pensi ad esempio alla traiettoria della palla, la velocità di esecuzione di un gesto tecnico, l'effetto impresso dopo un colpo, la posizione dell'avversario e l'andamento dello scambio, questo porta a richieste sempre diverse, dove la risposta motoria non può essere definita del tutto prima dell'azione, ma deve essere continuamente aggiornata nel corso dello scambio (Starzak *et al.*, 2024; Edel *et al.*, 2019). La qualità della prestazione dipende quindi dalla capacità di integrare in modo rapido processi percettivi, elaborazione cognitiva, scelta decisionale e adattamento motorio (Heilmann *et al.*, 2022; Pancar, 2020). A questo proposito, Pancar (2020) ha confrontato direttamente atleti di tennistavolo (sport *open-skill*) e atleti di atletica leggera (sport *closed-skill*) attraverso una serie di test cognitivi, riscontrando che i primi ottenevano risultati migliori in termini di attenzione, velocità nell'elaborare le informazioni e capacità di sopprimere

risposte automatiche non adeguate al contesto. Questo risultato conferma, nello specifico, per gli sport di racchetta, quanto affermato in precedenza sugli sport *open-skill* (Wang *et al.*, 2023; Heilmann *et al.*, 2022; Pancar, 2020). All'interno di quest'ultimi possano essere individuate sottocategorie più specifiche (Wang *et al.*, 2023). Wang e colleghi (2023) distinguono tra sport intercettivi, nei quali la prestazione richiede la coordinazione tra il movimento del corpo o di un attrezzo e oggetto in movimento nell'ambiente e sport strategici, come il calcio e la pallavolo, che implicano l'elaborazione simultanea di informazioni complesse relative a compagni, avversari e posizione in campo. Secondo questa classificazione, gli sport di racchetta rientrano prevalentemente tra gli sport intercettivi, nei quali la prestazione dipende in misura rilevante dalla coordinazione tra il movimento del corpo o dell'attrezzo e l'intercettazione di un oggetto in movimento (Wang *et al.*, 2023). Questa caratteristica comporta richieste particolarmente elevate sul piano del monitoraggio visivo-percettivo, della rapidità di risposta e della capacità di adattare l'azione motoria alle continue variazioni della situazione di gioco (Wang *et al.*, 2023). Gli autori precisano, inoltre, che negli sport intercettivi non è sufficiente reagire velocemente: ciò che fa la differenza è la capacità di coordinare con precisione l'elaborazione dell'informazione visiva con la programmazione ed esecuzione del movimento, integrando in modo preciso i processi percettivi con quelli motori (Wang *et al.*, 2023)."

2.4.3 Richieste degli sport di racchetta e relativi benefici sulla salute

Gli sport di racchetta si caratterizzano per una combinazione particolarmente articolata di richieste fisiche, cognitive e psicologiche che li rende tra le discipline sportive più complete dal punto di vista delle esigenze prestazionali (Cádiz Gallardo *et al.*, 2023; Starzak *et al.*, 2024). Dal punto di vista fisico, questi sport sono definiti da una struttura aciclica dell'*effort*, nella quale fasi di impegno ad alta intensità si alternano a brevi pause che non consentono un recupero completo (Cádiz Gallardo *et al.*, 2023). La natura intermittente di queste discipline richiede lo sviluppo sia della capacità aerobica sia di quella anaerobica, a cui si aggiungono qualità come la forza muscolare, la velocità, l'agilità, la flessibilità e la coordinazione motoria (Starzak *et al.*, 2024). Le richieste fisiche variano in modo significativo a seconda dello sport di racchetta considerato, in funzione di variabili quali le dimensioni del campo, la durata dei punti, i tempi di recupero previsti dal regolamento e il tipo di movimenti richiesti durante il gioco (differenze che verranno affrontate successivamente nel paragrafo 2.5). La partecipazione continuativa a queste attività è associata a miglioramenti significativi della capacità cardiorespiratoria, della composizione corporea e della funzionalità muscolare (Pluim *et al.*, 2007; Groppel & DiNubile, 2009). Ricerche condotte su atleti di tennis hanno evidenziato valori di consumo massimo di ossigeno più favorevoli, percentuali di grasso corporeo inferiori e un profilo lipidico più vantaggioso rispetto a soggetti sedentari o impegnati in attività a bassa intensità (Pluim *et al.*, 2007).

La struttura intermittente del gioco, quindi con l'alternanza tra fasi di sforzo intenso e brevi recuperi, mette sotto sforzo l'organismo sia sul piano aerobico che anaerobico, favorendo lo sviluppo integrato di resistenza, velocità, agilità e coordinazione (Cádiz Gallardo *et al.*, 2023). Sul versante muscolo-scheletrico, i movimenti multidirezionali e le azioni rapide ed esplosive tipiche di queste discipline sottopongono le ossa a un carico meccanico che, soprattutto quando la pratica inizia in giovane età o viene mantenuta nel tempo, contribuisce a rafforzare la struttura ossea (Pluim *et al.*, 2007). Groppe e DiNubile (2009) sottolineano inoltre come la partecipazione regolare al tennis per almeno tre ore settimanali a intensità moderatamente vigorosa sia associata a una riduzione rilevante del rischio di mortalità per tutte le cause, e come l'attività sia in grado di rallentare il declino della capacità cardiorespiratoria legato all'invecchiamento.

Sul piano cognitivo, la prestazione negli sport di racchetta dipende in misura rilevante dalla capacità di controllare l'attenzione, anticipare le azioni dell'avversario e adattare rapidamente la risposta motoria alle variazioni continue della situazione di gioco (Starzak *et al.*, 2024). In questo senso, il controllo attentivo riveste un ruolo centrale; l'atleta deve seguire il movimento della palla o del volano, anticiparne la traiettoria e programmare il gesto tecnico in tempi estremamente ridotti. Starzak e colleghi (2024), evidenziano come la direzione dell'attenzione influenzi in modo significativo l'apprendimento e la performance delle abilità tecniche, con un focus esterno, ovvero orientato agli effetti del movimento nell'ambiente, che tende a produrre risultati superiori rispetto a un focus interno centrato sul movimento corporeo stesso (Starzak *et al.*, 2024). A questo si aggiunge la necessità di elaborare rapidamente informazioni provenienti da più fonti simultanee, integrando la percezione visiva con la pianificazione motoria in tempi molto stretti, una caratteristica che accomuna questi sport alla categoria delle attività intercettive (Wang *et al.*, 2023). Costa e colleghi (2022) hanno inoltre evidenziato come le funzioni esecutive, tra cui il controllo attentivo, la memoria di lavoro e l'inibizione delle risposte automatiche, siano direttamente coinvolte nella qualità delle prestazioni tecnico-tattiche negli sport con palla, e come la loro compromissione, ad esempio in seguito a fatica mentale, si traduca in un peggioramento misurabile della *performance*. Tali richieste costituiscono al contempo la base dei benefici cognitivi associati a queste discipline: la letteratura sugli sport *open-skill* indica che la loro pratica è associata a miglioramenti nelle funzioni esecutive, tra cui la memoria di lavoro, la flessibilità cognitiva e il controllo inibitorio, in misura superiore rispetto agli sport *closed-skill* (Heilmann *et al.*, 2022; Pancar, 2020), proprio in virtù della necessità di adattarsi continuamente a stimoli ambientali imprevedibili e in rapida evoluzione. Le strategie di focalizzazione attentiva richieste durante il gioco, tra i quali troviamo anche la capacità di alternare attenzione selettiva e attenzione distribuita, rappresentano un allenamento sistematico per i meccanismi di controllo cognitivo (Starzak *et al.*, 2024). È utile notare che la letteratura sulla fatica

mentale documenta come un eccessivo carico cognitivo possa compromettere le decisioni e la precisione tecnica negli sport con palla (Costa et al., 2022), suggerendo che la pratica prolungata, e la conseguente automatizzazione dei processi attentivi, possa rappresentare un fattore protettivo contro questi effetti.

La dimensione psicologica rappresenta un ulteriore elemento determinante della prestazione negli sport di racchetta. La velocità degli scambi, la pressione competitiva e la necessità di compiere scelte rapide in situazioni di incertezza richiedono solide abilità di autoregolazione emotiva, gestione dell'*arousal* e mantenimento della concentrazione (Costa et al., 2022). In condizioni di elevata richiesta cognitiva, o in presenza di fatica mentale, possono emergere cali nella precisione tecnica e nelle scelte tattiche (Costa et al., 2022). La resilienza psicologica, insieme alla capacità di riorientare l'attenzione dopo un errore o un momento critico, contribuisce quindi alla stabilità della *performance* (Starzak et al., 2024). Sul versante dei benefici, gli sport di racchetta favoriscono lo sviluppo di competenze autoregolatrici e contribuiscono al benessere emotivo (Groppel & DiNubile, 2009). Praticare tennis è stato associato a livelli ridotti di stress percepito, a una migliore gestione dell'ansia competitiva e a indicatori più elevati di vigore psicologico (Groppel & DiNubile, 2009). Il confronto diretto con un avversario, la gestione dei momenti ad alta pressione e la necessità di mantenere la concentrazione anche dopo errori o scambi sfavorevoli costituiscono contesti privilegiati per lo sviluppo di autocontrollo, resilienza e senso di autoefficacia (Starzak et al., 2024).

L'interazione continua tra dimensione motoria, cognitiva ed emotiva fa quindi degli sport di racchetta un mezzo efficace non solo per la salute fisica ma anche per la promozione della salute mentale. Come evidenziato da Groppel e DiNubile (2009), il tennis (per estensione gli sport di racchetta) offre un contesto in cui le stimolazioni fisiche e mentali agiscono contemporaneamente, producendo effetti che vanno oltre la dimensione prettamente prestazionale e che si riflettono positivamente sulla qualità di vita dell'individuo.

2.5 Specificità dei principali sport di racchetta

Pur condividendo principi tecnici e strutturali di base, i principali sport di racchetta si differenziano tra loro per le richieste percettive, motorie e fisiologiche imposte agli atleti (Cádiz Gallardo et al., 2023). Le differenze emergono principalmente in relazione alla velocità di gioco, alle dimensioni del campo, ai tempi di volo della palla, al grado di prevedibilità delle traiettorie e alla densità degli stimoli attentivi presenti durante lo scambio (Edel et al., 2019; Starzak et al., 2024). L'attività in tutti gli sport di racchetta, come accennato nel paragrafo precedente, è di natura intermittente e la domanda fisiologica è determinata in larga misura dalla superficie, dall'attrezzatura, dalle caratteristiche della pallina, dall'intensità con cui la partita viene disputata e da fattori ambientali come temperatura e

umidità (Lees, 2003). La durata delle competizioni può variare da appena 6 minuti nello squash fino a oltre 5 ore nel tennis, nonostante durate comprese tra 20 e 90 minuti siano le più comuni tra le discipline (Lees, 2003). I *rally*, scambi continui di colpi che avvengono tra due o più giocatori dopo il servizio, hanno una durata tipica compresa tra 3 e 10 secondi, ed è proprio durante queste fasi di gioco attivo che l'intensità dello sforzo raggiunge il suo picco massimo; la lunghezza degli scambi diventa quindi determinante per i sistemi energetici che vengono messi sotto stress (Lees, 2003). Il rapporto tra lavoro e riposo, che definisce il carico complessivo del gioco, si attesta mediamente intorno a 0.5, con cambiamenti sia per le diverse discipline sia in funzione del livello competitivo (Lees, 2003).

Agli aspetti fisiologici segue la dimensione cognitiva degli sport di racchetta. Queste discipline appartengono alla categoria degli sport *open-skill*, il giocatore, quindi, non può controllare le condizioni esterne, ma deve adattarsi ad esse in tempo reale in quanto si trova all'interno di un ambiente dinamico, imprevedibile e in continua evoluzione (Wang *et al.*, 2023). Queste caratteristiche impongono un'elaborazione rapida e continua delle informazioni visive provenienti dall'avversario, una lettura anticipata delle traiettorie e una serie di decisioni motorie che si succedono a distanza di frazioni di secondo (Starzak *et al.*, 2024). La rapidità mentale, intesa come capacità di prestare attenzione agli aspetti salienti del gioco, anticipare le scelte dell'avversario e reagire prima ancora che l'azione si completi, rappresenta quindi una componente trasversale di tutti gli sport di racchetta (Lees, 2003). Questa non va però confusa con la semplice velocità di reazione; nei momenti più critici di un incontro, ciò che distingue i giocatori di alto livello è la capacità di mantenere lucidità decisionale anche sotto pressione, gestendo al tempo stesso la componente emotiva e quella tattica (Dares & Eriksson, 2022). In questo senso, la solidità mentale dell'atleta, la sua capacità di restare concentrato e determinato anche nelle situazioni più difficili, emerge come uno dei fattori più rilevanti per la prestazione negli sport individuali di racchetta (Dares & Eriksson, 2022).

2.5.1 Tennis

Il tennis si disputa su un campo di grandi dimensioni, con tempi di volo della palla variabili in funzione della superficie di gioco e della potenza dei colpi. Una caratteristica distintiva di questa disciplina è che rappresenta l'unico sport di racchetta disputato ufficialmente su superfici diverse (*i.e.*, terra battuta, cemento, erba e moquette) portando quindi a modificare le caratteristiche di rimbalzo della palla e influenzando in modo significativo le richieste tecnico tattiche (Edel *et al.*, 2019). Le superfici vengono classificate dall'ITF (*International Tennis Federation*) come tipo 1, 2 e 3 in base alla loro velocità, abbinandole a tre tipologie di pallina studiate per ciascun contesto di gioco (Lees, 2003). Inoltre, la racchetta da tennis è la più pesante tra quelle usate negli sport di racchetta, e questo

incide in modo non trascurabile sul costo energetico della produzione del colpo, indipendentemente dagli spostamenti sul campo (Edel *et al.*, 2019). Dal punto di vista fisiologico, lo sport richiede un equilibrio tra capacità aerobica e anaerobica, con un dispendio energetico totale elevato per via della lunga durata degli incontri (Cádiz Gallardo *et al.*, 2023; Pluim *et al.*, 2007; Edel *et al.*, 2019). I valori di lattato nel sangue durante il gioco si attestano normalmente intorno a 3–4 mmol·l⁻¹, a conferma della natura prevalentemente aerobica della disciplina (Lees, 2003). Nelle fasi più intense della partita, però, le concentrazioni possono superare i 10 mmol·l⁻¹, e già oltre i 7–8 mmol·l⁻¹ si registra un declino della prestazione tecnica e tattica (Lees, 2003). Questa informazione risulta essere molto importante perché nel tennis la gestione dell'intensità non riguarda solo la condizione fisica, ma si ripercuote direttamente sulla qualità delle decisioni prese in campo, poiché superata una certa soglia metabolica la fatica compromette l'intero sistema decisionale del giocatore (Costa *et al.*, 2022). Secondo Lees (2003) i segnali di decadimento passano dal peggioramento del posizionamento, *timing* impreciso dei colpi e una progressiva perdita di precisione, con cali dell'accuratezza dei dritti fino al 69% rispetto ai valori di partenza registrati nel test di simulazione. Le richieste cognitive si concentrano in particolare modo sull'anticipazione tattica, sulla lettura delle traiettorie a media e lunga distanza e sulla pianificazione strategica punto per punto (Lees, 2003). Uno degli aspetti più studiati in questo senso riguarda le differenze tra giocatori esperti e meno esperti nella risposta al servizio: i primi concentrano inizialmente lo sguardo sul complesso braccio-racchetta-spalla dell'avversario per poi seguire la palla, mentre i secondi tendono a fissarsi sull'area di lancio attesa o a inseguire la pallina solo dopo l'impatto (Lees, 2003). Questa capacità anticipatoria, costruita nel tempo attraverso l'esperienza, fa una differenza concreta nei momenti in cui il margine di reazione è minimo (Lees, 2003).

La resistenza mentale assume nel tennis una rilevanza del tutto particolare (Dares & Eriksson, 2022). L'assenza di un limite di tempo, la struttura del punteggio che permette continue inversioni di *momentum* e la natura individuale della competizione fanno sì che, quando i livelli tecnici tra due giocatori sono equivalenti, l'esito dell'incontro dipenda per l'80–90% dalla componente mentale (Dares & Eriksson, 2022). I *break point*, i punti in parità e i punti del *tiebreak* vengono considerati come punti di pressione e rappresentano momenti critici capaci di ribaltare completamente l'andamento di una partita, e la capacità di gestirli con lucidità è uno degli elementi che più distinguono i giocatori *d'élite* dagli altri (Dares & Eriksson, 2022).

2.5.2 Tennistavolo

La Federazione Internazionale di Tennistavolo (ITTF) fu fondata nel 1926 a Londra, in occasione del primo Campionato del Mondo, e rappresenta oggi la federazione sportiva con il maggior numero di associazioni nazionali affiliate, pari a 226 (Fuchs *et al.*, 2018). Nel 1988 ha ottenuto il riconoscimento olimpico velocizzandone l'espansione e la professionalizzazione anche sul piano delle metodologie di ricerca (Fuchs *et al.*, 2018).

Il tennistavolo è caratterizzato da scambi tra i più rapidi tra gli sport di racchetta (Cádiz Gallardo *et al.*, 2023). Gli incontri hanno una durata media compresa tra 16 e 23 minuti, con scambi molto brevi di 3,4 s (DS=1,7) e pause di recupero altrettanto contenute di 8,1 s (DS=5,1), il tempo di gioco effettivo rappresenta il 44,3% della durata totale, con una *work density* (*i.e.*, rapporto tra tempo di gioco effettivo e tempo di recupero) pari a 0,4, comparabile a quella di badminton e tennis ma di molto inferiore a quella dello squash (Edel *et al.*, 2019). La frequenza di colpi si attesta intorno a 0,59 colpi al secondo, con una media tra 3,9 e 5,1 colpi per *rally* (Edel *et al.*, 2019). Le ridotte dimensioni del tavolo da gioco e l'elevata velocità della pallina impongono margini di tempo decisionale molto ristretti, anche minime variazioni di effetto, angolazione o traiettoria richiedono risposte motorie immediate (Cádiz Gallardo *et al.*, 2023). Le richieste attentive sono quindi particolarmente intense, e la precisione tecnica deve essere preservata nonostante il ritmo di gioco molto sostenuto (Cádiz Gallardo *et al.*, 2023). Sul piano motorio, i movimenti degli arti inferiori e delle spalle sono caratterizzati da un'ampiezza ridotta rispetto agli altri sport della categoria, con pochi salti e distanze minime percorse, poiché i colpi vengono eseguiti prevalentemente con il segmento superiore del corpo (Edel *et al.*, 2019). Di conseguenza, i valori medi di frequenza cardiaca, consumo di ossigeno e concentrazione di lattato risultano i più contenuti tra i principali sport di racchetta, a conferma che la prestazione dipende in misura prevalente dall'abilità tecnico-tattica e dalla resistenza muscolare, piuttosto che dalla capacità cardiorespiratoria (Edel *et al.*, 2019; Kondrič *et al.*, 2013).

L'attrezzatura leggera, la piccola area di gioco e la breve durata degli incontri confermano un quadro di richieste fisiologiche complessivamente inferiori rispetto alle altre discipline (Lees, 2003). Al termine di una competizione i giocatori di tennistavolo risultano non soltanto fisicamente affaticati, ma anche sottoposti a un elevato livello di tensione psicologica, elemento che deve essere considerato nella pianificazione dei carichi e dei periodi di recupero (Kondrič *et al.*, 2013). Il metodo delle tre fasi, divide il *rally* nel tennistavolo in attacco dopo il servizio per il primo e terzo colpo, attacco dopo la ricezione per il secondo e quarto colpo, e scambio dal quinto colpo in poi, costituisce ancora oggi il principale approccio all'analisi della prestazione nel tennistavolo, completato da indici quantitativi come il tasso di efficacia tecnica (Fuchs *et al.*, 2018).

L'analisi del lavoro di gambe ha evidenziato che il passo singolo è il movimento più frequente nei giocatori d'*élite*, seguito dal pivot e dallo chassé (Fuchs *et al.*, 2018). I giocatori asiatici utilizzano più frequentemente pivot e *crossover* rispetto agli europei, che prediligono spostamenti più conservativi (Fuchs *et al.*, 2018). In Fuchs e colleghi (2018) emerge come fare meno errori risulta più vantaggioso per la vittoria rispetto al tentativo di realizzare punti diretti, inoltre gli scambi che superano i cinque colpi si confermano particolarmente incisivi sull'esito del punto. Sul piano psicologico, L'analisi del *momentum*, intesa come misura di quanto un giocatore stia dominando in un determinato momento della partita, ha mostrato che nelle partite vinte i giocatori attraversano più fasi di dominio e meno fasi di difficoltà rispetto alle partite perse, confermando quanto la gestione dei momenti critici sia rilevante anche in questa disciplina (Fuchs *et al.*, 2018).

2.5.3 Badminton

Il badminton si disputa al meglio dei tre *set*, ciascuno dei quali si conclude quando uno dei giocatori raggiunge 21 punti con almeno due punti di vantaggio, secondo il sistema *rally point* introdotto dalla *Badminton World Federation* nel 2006 in sostituzione del precedente formato a 15 punti (Edel *et al.*, 2019). Come negli altri sport di racchetta, i giocatori hanno la possibilità di modulare parzialmente il proprio carico fisiologico agendo sulla durata delle pause tra un *rally* e l'altro e tra i *set*, adattando così l'intensità dello sforzo alle proprie condizioni fisiche nel corso della partita (Lees, 2003). Il badminton presenta un profilo fisiologico tra i più impegnativi dell'intera categoria di sport di racchetta (Edel *et al.*, 2019; Lees, 2003). È l'unica giocata con un volano, un oggetto che raggiunge velocità elevatissime all'impatto per poi decelerare rapidamente, producendo traiettorie difficili da anticipare e che cambiano in modo continuo durante lo scambio e con una forma totalmente diversa rispetto ai diversi tipi di palline a forma sferica degli altri principali sport di racchetta (Edel *et al.*, 2019). Questo costringe il giocatore a sfruttare costantemente tutte le informazioni visive disponibili, leggendo sia la traiettoria del volano sia i movimenti dell'avversario, con continui cambi di direzione, salti e affondi eseguiti da posture molto variabili (Edel *et al.*, 2019). Le risposte cardiorespiratorie sono tra le più elevate registrate negli sport di racchetta, mentre le concentrazioni di lattato rimangono basse, coinvolgendo il corpo sia in attività aerobica che anaerobica, vista la natura intermittente dell'attività sportiva (Edel *et al.*, 2019; Cádiz Gallardo *et al.*, 2023). La frequenza cardiaca raggiunge valori molto alti: le medie registrate si attestano all'80% della frequenza massima per oltre l'85% della durata del gioco, con picchi del 95% nei giocatori d'*élite* (Lees, 2003). Dal punto di vista biomeccanico, la velocità della testa della racchetta nei colpi potenti deriva in misura sostanziale dalla rotazione dell'avambraccio attorno al proprio asse longitudinale, con un contributo rilevante anche della pronazione e della flessione del polso (Lees, 2003). La capacità di anticipazione riveste quindi

un ruolo centrale: il tempo di reazione disponibile è talmente ridotto che leggere in anticipo i segnali motori dell'avversario non è un vantaggio, ma una necessità (Edel *et al.*, 2019). Anche nel badminton l'attrezzatura gioca un ruolo importante. Durante gli affondi tipici di questo sport, le forze orizzontali esercitate dal piede sul suolo si attestano tra 0,5 e 0,7 volte il peso corporeo, con una distribuzione asimmetrica tra il lato della racchetta e quello opposto, evidenziando quanto le scarpe assumano una rilevanza tecnica specifica nella loro scelta (Lees, 2003).

2.5.4 Squash

Lo squash si distingue dagli altri sport di racchetta per una caratteristica strutturale fondamentale: i due giocatori non competono da lati opposti del campo, ma condividono lo stesso spazio di gioco, senza rete e senza delimitazioni personali, utilizzando le pareti per far rimbalzare la pallina (Edel *et al.*, 2019). Originatosi all'inizio del XIX secolo presso la *Harrow School* in Inghilterra, lo sport ha conosciuto uno sviluppo considerevole nei due secoli successivi, fino a essere riconosciuto come disciplina olimpica per i Giochi di Los Angeles 2028 (Liu *et al.*, 2025). Questa configurazione aggiunge ai movimenti motori tipici della categoria quali affondi e passi laterali anche movimenti rotatori legati ai rimbalzi dalla parete posteriore. Il ritmo di gioco è continuo e sostenuto, con pause molto limitate tra un punto e l'altro con una percentuale di tempo effettivo di gioco nettamente superiore rispetto alle altre discipline (Edel *et al.*, 2019). Sul piano fisiologico, i *rally* possono durare da appena 1,5 secondi fino a 10 minuti, con concentrazioni di lattato nel sangue che nelle fasi più intense, specialmente verso il termine della partita, possono superare i $10 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ (Lees, 2003). Le richieste fisiche e cognitive risultano elevate e prolungate nel tempo, rendendo lo squash particolarmente impegnativo sia sul piano della resistenza sia su quello del controllo decisionale sotto affaticamento (Edel *et al.*, 2019). Il sistema anaerobico gioca in questa disciplina un ruolo più rilevante rispetto agli altri sport della categoria, proprio per via del ritmo di gioco sostenuto e delle pause ridotte (Edel *et al.*, 2019). La condivisione dello spazio di gioco introduce infine un rischio specifico di infortuni alla testa e agli occhi, legato alla vicinanza tra i giocatori e alle oscillazioni della racchetta all'altezza del viso; l'uso di occhiali protettivi rappresenta una misura di controllo facilmente adottabile e raccomandata (Lees, 2003).

2.5.5 Padel

Il padel è uno sport di racchetta moderno che si gioca in doppio, inventato ad Acapulco, in Messico, nel 1962 (García-Giménez *et al.*, 2022). Il campo misura 20×10 metri ed è delimitato da pareti di vetro e metallo che fanno rimbalzare la palla durante gli scambi, una caratteristica strutturale esclusiva di questa disciplina che la distingue dal tennis e dal badminton, giocati su campi più grandi e senza

pareti (Lees, 2003; García-Giménez *et al.*, 2022). Questa caratteristica porta ad avere *rally* più lunghi, aggiungendo una componente tattica legata alla gestione degli spazi e dei rimbalzi a parete che non ha equivalenti negli altri sport di racchetta (García-Giménez *et al.*, 2022). La durata dei *rally* si distribuisce nelle fasce comprese dai 3–6, 6–9 e 9–12 secondi, con la tendenza, rispetto agli altri sport di racchetta, di avere scambi più lunghi, poiché le pareti permettono ai giocatori di recuperare colpi che altrimenti sarebbero persi, aiutando così lo sviluppo del gioco e aggiungendo una dimensione tattica legata al rimbalzo che non ha equivalenti nelle altre discipline di racchetta (García-Giménez *et al.*, 2022). Il sistema di punteggio ricalca quello del tennis, con le stesse regole per il servizio, le ricezioni, la posizione dei giocatori e il conteggio dei punti (García-Giménez *et al.*, 2022). Nel corso degli anni il padel ha conosciuto una crescita molto rapida, diventando particolarmente radicato in Spagna, dove conta oltre 4 milioni di praticanti abituali e si colloca tra i primi dieci sport del paese, con una diffusione in 44 nazioni a livello internazionale (García-Giménez *et al.*, 2022).

Sul piano fisiologico, il padel ha un profilo prevalentemente aerobico (García-Giménez *et al.*, 2022). Durante le partite il consumo di ossigeno si mantiene generalmente al di sotto del 50% del VO_2 max; quindi, il corpo consuma energia a un ritmo sostenibile, senza andare in affanno o accumulare stanchezza muscolare rapidamente. (García-Giménez *et al.*, 2022). La frequenza cardiaca media, indicatore diretto rispetto allo sforzo, si pone tra il 68% e il 74% della frequenza cardiaca massima, con picchi dell'80 e 85% nelle fasi più intense della gara (García-Giménez *et al.*, 2022). Il tempo di gioco effettivo corrisponde a circa il 46% della durata totale dell'incontro, con un rapporto lavoro-riposo di circa 0,84 (García-Giménez *et al.*, 2022). Circa il 70% degli incontri professionistici si conclude in due *set*, con una maggiore frequenza di *set* equilibrati e *tiebreak* nella categoria maschile rispetto a quella femminile (García-Giménez *et al.*, 2022). Le richieste cognitive si concentrano principalmente sulla capacità di anticipare traiettorie multirimbalo e di interpretare le intenzioni dell'avversario in un contesto che, per sua natura, è sempre di doppio (Cádiz Gallardo *et al.*, 2023). Sul piano biomeccanico sono stati individuati specifici segnali posturali utilizzabili come *pre-cue*: in particolare, l'altezza della mano e la posizione del tallone del piede libero prima del colpo risultano indicatori affidabili per anticipare la direzione della palla dopo il rimbalzo a parete (García-Giménez *et al.*, 2022). Lo studio di García-Giménez e colleghi (2022) presenta dati legati al tasso di infortuni del padel, sottolineando come avvengano circa 2,75 infortuni per 1000 ore di esposizione, con una prevalenza a carico degli arti inferiori e in particolare delle strutture tendinee, muscolari e legamentose (García-Giménez *et al.*, 2022). Le aree corporee più frequentemente interessate comprendono la fascia plantare, il polpaccio, il ginocchio, i tendini del bicipite femorale, la zona lombare e la spalla (García-Giménez *et al.*, 2022).

2.6 Stato dell'arte e obiettivi

La letteratura ha finora riassunto gli effetti del *biofeedback* e del *neurofeedback* sulla popolazione di atleti attraverso diverse revisioni sistematiche e metanalisi, che nel complesso hanno coinvolto sportivi provenienti da discipline molto eterogenee tra loro. Focalizzandoci sul *neurofeedback*, la metanalisi di Yu e colleghi (2025) ha incluso 25 studi in sintesi qualitativa e 21 in metanalisi, per un totale di 271 partecipanti, riguardanti compiti motori quali tiro con l'arco, danza, tiro a segno con carabina, golf *putting*, equilibrio dinamico, ciclismo, calcio, sprint su ostacoli e tiro a pistola, riportando un effetto complessivo moderato e positivo sulla *performance* motoria (Hedges' $g = 0.78$, IC 95% 0.49–1.07), un effetto più marcato negli studi di qualità metodologica più alta secondo la checklist CRED-nf ($g = 1.07$ contro $g = 0.49$ negli studi di qualità più bassa), mentre nessuno dei fattori esaminati, incluso il tipo di sport, risultava statisticamente significativo. A conferma dell'eterogeneità già osservata, anche una seconda revisione sistematica di Cheng e colleghi (2024) che ha incluso 13 studi randomizzati controllati, si è incentrata specificamente sull'ipotesi dell'efficienza psicomotoria, ha preso in considerazione discipline in parte sovrapponibili, come: tiro con l'arco, danza, golf *putting*, tiro a segno, tiro nell'hockey su ghiaccio, pallacanestro ed equilibrio dinamico nel judo. Gli autori concludono che il neurofeedback presenta un margine reale di applicazione per l'ottimizzazione della performance sportiva, in particolare nei compiti di precisione come il tiro e il *putting* nel golf. Su 13 studi complessivamente analizzati, solamente 1 discute i propri risultati collegandoli in modo esplicito al quadro teorico dell'efficienza psicomotoria: la maggior parte degli studi, quindi, misura gli effetti del neurofeedback senza però interpretarli alla luce di questa teoria di riferimento. A ciò si aggiunge un'ulteriore criticità: la scelta di quale segnale cerebrale allenare (ad esempio onde theta, onde alpha, o il ritmo sensomotorio) cambia da uno studio all'altro, rendendo difficile confrontare direttamente i risultati tra i vari protocolli. Una terza revisione sull'uso del *neurofeedback* nell'allenamento sportivo ha ampliato ulteriormente lo spettro di discipline coinvolte, includendo 10 studi con un totale di 491 partecipanti nei gruppi sperimentali e 62 nei gruppi di controllo, relativi ad atleti professionisti di judo, pallavolo, portieri di calcio, nuoto, atletica leggera e tiro a segno (Rydzik *et al.*, 2023). Rydzik e colleghi (2023), ottengono risultati che nel complesso indicano un impatto positivo del neurofeedback sulla *performance* sportiva, come: riduzione dello stress, maggiore autoregolazione fisiologica e miglior tempo di reazione. Nonostante ciò, sottolineano la necessità di una maggiore uniformità dei protocolli e di studi replicati all'interno di ciascuna disciplina sportiva. Sul lato del *biofeedback* cardiaco (HRV), una revisione sistematica limitata a soli studi randomizzati controllati ha analizzato l'effetto dell'HRV *biofeedback* sulla *performance* in 187 atleti tra cestisti, mezzofondisti e fondisti, calciatori professionisti e ballerini universitari (Pagaduan *et al.*, 2020). Anche qui, si riportano risultati complessivamente a favore dell'HRV BFB nel

migliorare la funzione motoria fine e grossolana, ma con esiti eterogenei e in parte contrastanti a seconda del tipo di compito motorio e della disciplina considerata, al punto che gli stessi autori invitano alla cautela nel generalizzare i risultati oltre le popolazioni atletiche specificamente indagate. Un contributo più recente ha ampliato ulteriormente la prospettiva, adottando un'analisi bayesiana per valutare congiuntamente gli effetti di *biofeedback* e *neurofeedback* su tre domini distinti: salute mentale, performance atletica e performance cognitiva (Zhang *et al.*, 2025). Questo lavoro di Zhang e colleghi (2025) coinvolge al suo interno 41 studi randomizzati controllati per un totale di 1230 atleti, riscontrando effetti positivi e statisticamente significativi in tutti e tre gli ambiti, con benefici particolarmente marcati nella riduzione dell'ansia, nella *performance* cestistica e nel controllo attentivo, nonostante gli stessi autori segnalano anch'essi un'eterogeneità elevata tra gli studi, non risolta nemmeno dalle analisi per sottogruppi, e una certezza dell'evidenza complessivamente bassa, imputabile anche alla varietà di discipline e protocolli inclusi nell'analisi. Il limite comune a tutte le revisioni esaminate risiede nell'avere trattato la popolazione atletica come categoria sostanzialmente omogenea, senza distinguere sistematicamente tra le diverse discipline sportive che la compongono. Si può ipotizzare che questa eterogeneità dipenda anche da un problema più a monte: raggruppare sport molto diversi tra loro, come il tiro con l'arco e la danza, oppure il golf *putting* e la pallacanestro, sotto un'unica etichetta di “atleti” rischia di produrre risultati poco rappresentativi. Ogni disciplina ha infatti richieste percettivo-motorie e psicofisiologiche proprie: uno sport di mira privilegia il controllo della postura statica e la soppressione dell'attività corticale irrilevante nella fase che precede il gesto, mentre uno sport di squadra richiede decisioni rapide sotto pressione, e uno sport di resistenza chiama in causa soprattutto la regolazione autonoma. Un dato aggregato rischia di semplificare, o addirittura di annullare, queste differenze. Per questo motivo sarebbe utile un approccio più mirato: studiare singole discipline, oppure macrocategorie di sport che condividono caratteristiche simili, ad esempio gli sport di racchetta, gli sport di squadra o gli sport individuali di precisione. Questo permetterebbe di ottenere risultati più coerenti tra loro e più facilmente applicabili alla pratica clinica. Il *biofeedback* e il *neurofeedback* in ambito sportivo, infatti, richiedono un intervento individualizzato, calibrato sulle richieste specifiche dello sport praticato. Una letteratura organizzata per categorie sport-specifiche darebbe quindi indicazioni più utili a chi deve costruire un protocollo di allenamento su misura. A conferma di questa lacuna, tra le discipline coperte dai campioni di studi primari inclusi nelle cinque revisioni considerate non compare alcuno sport di racchetta trattato come oggetto sistematico di indagine: né il tennis, né il tennistavolo, né il badminton, né lo squash, né il padel, non risultano rappresentati come categoria a sé in nessuna delle revisioni analizzate (Yu *et al.*, 2025; Cheng *et al.*, 2024; Rydzik *et al.*, 2023; Pagaduan *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2025). È presente un unico riferimento bibliografico isolato, la revisione sistematica di Rydzik e colleghi (2023). Tra

gli studi inclusi in questo lavoro compare una ricerca condotta su un campione di atleti professionisti di età compresa tra 16 e 34 anni, 18 nel gruppo sperimentale, 21 nel gruppo di controllo, rappresentativo di numerose discipline, tra cui tiro con l'arco, tiro a segno, scherma, wakeboard, atletica leggera, pallavolo, pallacanestro, sci, sci di fondo, nuoto, tennis, ciclismo, taekwondo, tennis da tavolo e kart, nel quale tennis e tennistavolo compaiono solo all'interno di un campione multidisciplinare molto ampio, senza alcuna separazione o approfondimento specifico per categoria sportiva (Rydzik *et al.*, 2023). Questo quadro complessivo mostra come, a fronte di un interesse in continuo aumento per l'applicazione del *biofeedback* e del *neurofeedback* in ambito sportivo, la ricerca si sia finora concentrata su sport di precisione, sport di squadra e alcune discipline individuali, lasciando gli sport di racchetta privi di una trattazione sistematica autonoma. A questa mancanza si affianca un limite metodologico presente a tutte le revisioni esaminate: l'aver accostato discipline sportive eterogenee all'interno di un unico campione di studi primari, con il rischio di produrre conclusioni generalizzate e poco rappresentative delle singole discipline. È in questo spazio, tematico e metodologico, che si colloca il contributo della presente revisione sistematica, che si propone di approfondire e avere un *focus* sugli sport di racchetta, superando anche il limite campionario delle revisioni precedenti, offrendo per la prima volta una sintesi specifica delle evidenze relative al *biofeedback* e al *neurofeedback* applicati a un insieme di discipline omogenee e coerenti tra loro.

Capitolo 3 - Materiali e metodi della ricerca

3.1 Obbiettivo della ricerca

Come emerso dall'analisi della letteratura presentata nel capitolo precedente, gli studi che hanno indagato gli effetti del *biofeedback* e del *neurofeedback* sulla *performance* sportiva hanno finora trattato la popolazione atletica come un gruppo sostanzialmente unico, senza distinguere in modo sistematico tra le diverse discipline. Questo approccio ha permesso di raccogliere un primo quadro generale sull'efficacia di queste tecniche, ma ha lasciato scoperte alcune aree specifiche, tra cui quella degli sport di racchetta, che risulta ad oggi priva di una trattazione autonoma. Partendo da questa lacuna, la presente revisione sistematica si pone l'obiettivo di analizzare in modo mirato la letteratura disponibile sull'uso del *biofeedback* e del *neurofeedback* applicati a discipline come il tennis, il tennistavolo, il badminton, lo squash e il padel. L'intento è quello di raccogliere e organizzare le evidenze relative a un gruppo di sport che condividono caratteristiche motorie e percettive simili, così da offrire una sintesi più coerente e più facilmente utilizzabile nella pratica clinica e nell'allenamento sportivo. Nei paragrafi che seguono vengono quindi descritti nel dettaglio i criteri e le procedure adottate per condurre questa revisione: le modalità di ricerca bibliografica, i criteri di inclusione ed esclusione degli studi, il processo di selezione seguito e le strategie adottate per l'estrazione dei dati. Questo percorso metodologico segue le linee guida PRISMA, così da rendere il processo di ricerca trasparente e replicabile.

3.2 Strategia di ricerca

3.2.1 Database e interfacce consultate

La ricerca sistematica della letteratura è stata condotta consultando tre database, PubMed, Scopus e EBSCO, individuati in quanto fonti ampiamente diffuse nell'ambito della ricerca e ritenute in grado di coprire la maggior parte della letteratura rilevante sul tema. Non è stata presa in considerazione la letteratura grigia (*grey literature*), l'insieme di documenti non pubblicati attraverso i canali editoriali tradizionali e non sottoposto a un processo di revisione paritaria (*peer review*). Le stringhe di ricerca utilizzate sono state ritenute sufficientemente comprensive da coprire la letteratura rilevante sull'argomento. Il protocollo della presente revisione sistematica è stato preventivamente registrato nel registro Open Science Framework (OSF) con il seguente DOI identificativo: [10.17605/OSF.IO/5HTFA](https://doi.org/10.17605/OSF.IO/5HTFA)

3.2.2 Stringhe di ricerca

Per ciascuna fonte consultata è stata costruita una stringa di ricerca specifica, riportata di seguito.

- Scopus: TITLE-ABS-KEY (("biofeedback" OR "neurofeedback") AND ("tennis" OR "table tennis" OR "badminton" OR "squash" OR "padel" OR "pickleball" OR "racquetball"))
- PubMed: (biofeedback[tiab] OR neurofeedback[tiab]) AND (tennis[tiab] OR "table tennis"[tiab] OR badminton[tiab] OR squash[tiab] OR padel[tiab] OR pickleball[tiab] OR racquetball[tiab])
- EBSCOhost: AB (biofeedback OR neurofeedback) AND AB (tennis OR "table tennis" OR badminton OR squash OR padel OR pickleball OR racquetball)

Come specificato in sede di registrazione della revisione, la letteratura grigia è stata esclusa dalla strategia di ricerca in quanto non sottoposta a *peer review*. Le stringhe di ricerca sono state considerate adeguate a garantire una copertura sufficientemente ampia della letteratura disponibile sul tema, in assenza di ulteriori limiti (ad es., di data di pubblicazione) applicati in questa fase.

3.3 Criteri di inclusione e di esclusione

3.3.1 Criteri di inclusione

I criteri di inclusione stabiliti in sede di registrazione della revisione sono stati i seguenti:

- Studi che includessero come popolazione atleti praticanti sport di racchetta;
- Studi che includessero atleti sani;
- Studi che impiegassero interventi di *neurofeedback* e/o *biofeedback*.

3.3.2 Criteri di esclusione

In fase di definizione della strategia di ricerca sono stati stabiliti i seguenti criteri di esclusione:

- Articoli scritti in una lingua diversa dall'inglese;
- Studi che includessero analisi bayesiane;
- Articoli ritirati (*retracted*) a seguito di manipolazione dei dati;
- Studi che includessero soggetti con disturbi psichiatrici e/o neurologici non compensati.

Nella successiva fase di *screening*, tali criteri sono stati integrati con due ulteriori criteri di esclusione, applicati in sede di valutazione di titolo, *abstract* e parole chiave:

- Studi con esiti non pertinenti agli obiettivi della revisione;
- Studi che coinvolgessero atleti praticanti sport diversi da quelli di racchetta.

Sebbene il *neurofeedback* fosse esplicitamente contemplato tra i criteri di inclusione e la relativa strategia di ricerca includesse il termine "*neurofeedback*" accanto a "*biofeedback*" in tutte e tre le stringhe utilizzate, nessuno degli studi risultati eleggibili al termine del processo di selezione ha impiegato un intervento di *neurofeedback*. Tutti gli studi inclusi nella presente revisione hanno pertanto riguardato esclusivamente interventi di *biofeedback*. Tale circostanza verrà ripresa e discussa nel capitolo dedicato ai risultati.

3.4 Selezione degli studi

3.4.1 Procedura di *screening*

Il processo di selezione degli studi ha previsto, in una prima fase, la ricerca dei termini chiave all'interno del titolo, dell'*abstract* e delle parole chiave (*keywords*) degli articoli identificati attraverso la strategia di ricerca descritta nel paragrafo precedente. Gli studi duplicati sono stati successivamente rimossi mediante l'apposita funzione del *software* Rayyan. La fase di *screening* è stata condotta da due valutatori indipendenti, che hanno operato secondo una modalità di doppio cieco (*double-blind*), analizzando i record in maniera indipendente l'uno dall'altro. Nello specifico, la procedura di *screening* ha previsto la lettura del titolo e dell'*abstract* di ciascuno studio, confrontando successivamente le informazioni così ottenute con i criteri di esclusione definiti in fase di registrazione della revisione. Le eventuali discordanze emerse tra i due valutatori sono state risolte tramite discussione diretta tra gli stessi.

3.4.2 PRISMA *flow diagram*

Il processo di identificazione, *screening* e selezione degli studi inclusi nella presente revisione è stato condotto secondo le linee guida PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) ed è illustrato nella Figura 1. Attraverso la ricerca nei database e nell'interfaccia consultati sono stati complessivamente identificati 42 *record* (Scopus, n = 30; PubMed, n = 7; EBSCOhost, n = 5). Dopo la rimozione di 7 duplicati, sono stati sottoposti a *screening* 35 studi, di cui 21 sono stati esclusi sulla base della lettura di titolo e *abstract*. Dei 14 studi rimanenti, per i quali si è proceduto alla valutazione del testo integrale (*full text*), 2 non sono stati reperibili. Dei restanti 12 studi valutati per l'idoneità all'inclusione, 3 sono stati esclusi (esito di studio non pertinente, n = 1; lingua diversa dall'inglese, n = 1; duplicato, n = 1). Al termine del processo di selezione, 9 studi sono risultati eleggibili e sono stati inclusi nella presente revisione sistematica.

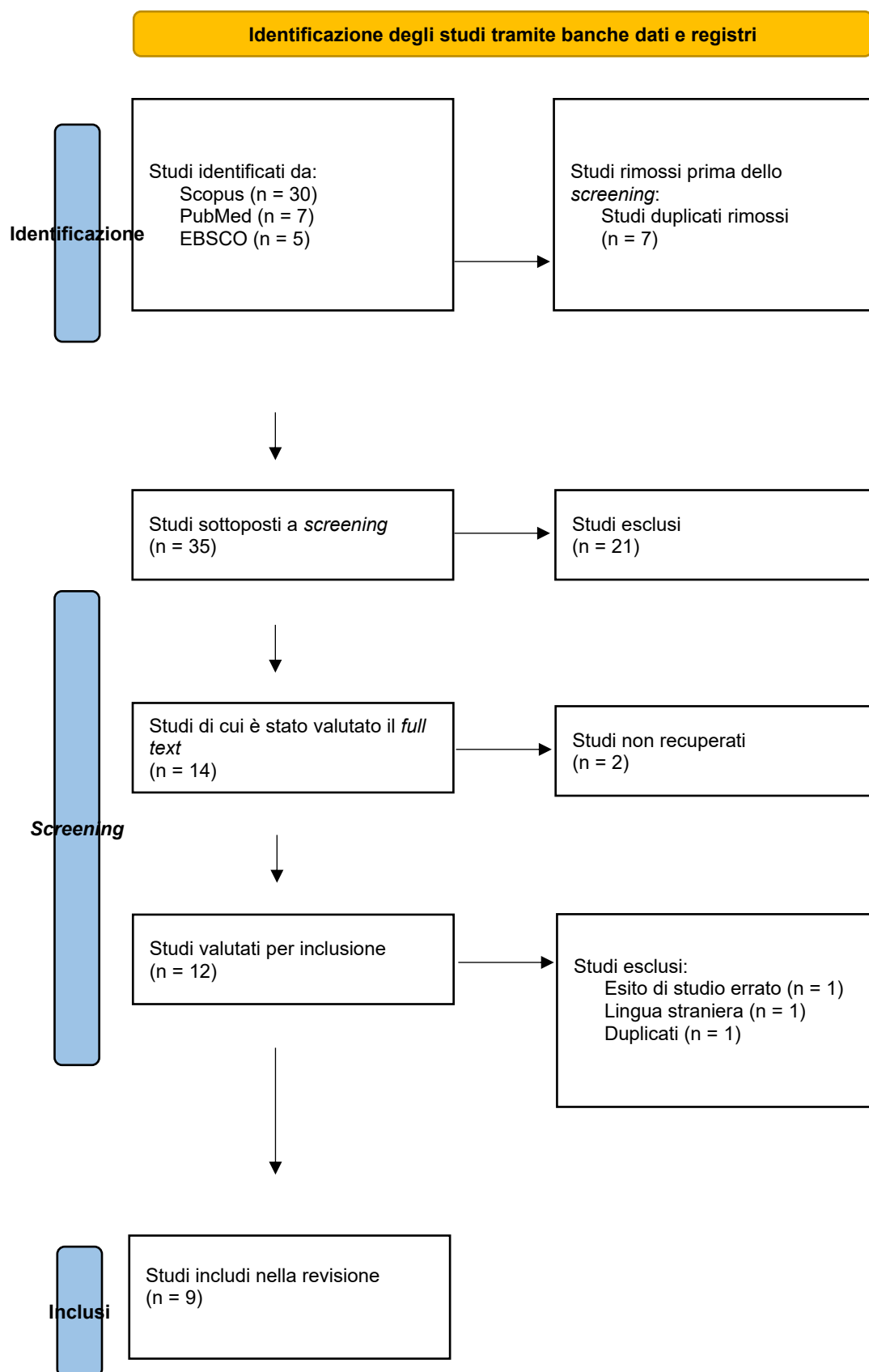


Figura 1. Diagramma di flusso PRISMA del processo di identificazione, *screening* e selezione degli studi

3.5 Estrazione dei dati

Per ciascuno degli studi inclusi nella presente revisione sono state estratte le seguenti informazioni: titolo dell'articolo, dimensione campionaria e caratteristiche demografiche del campione, paese in cui lo studio è stato condotto, obiettivi dello studio, metodi e procedura impiegati, principali risultati ottenuti e limiti. Il processo di estrazione dei dati è stato condotto da due estrattori indipendenti, che hanno lavorato parallelamente sugli stessi studi. Ciascun estrattore ha successivamente verificato il lavoro svolto dall'altro, al fine di controllarne l'accuratezza e la coerenza. La fase finale di estrazione è stata inoltre supervisionata e verificata da un terzo membro del team di ricerca. Agli estrattori sono state fornite istruzioni verbali sulle informazioni da estrarre da ciascun articolo, oltre a una tabella Word predisposta come guida per l'estrazione dei dati. Prima di avviare l'estrazione vera e propria, è stato condotto uno studio pilota per verificare che il compito fosse stato compreso correttamente. Il processo non ha previsto procedure di mascheramento tra i due estrattori, ma è stato chiesto loro di non condividere i dati estratti durante il lavoro, così da mantenere indipendenti le due estrazioni parallele. Le divergenze emerse sono state risolte tramite discussione diretta.

3.6 Risultati

Dei nove studi inclusi nella presente revisione sistematica, la totalità ha impiegato interventi di *biofeedback*, schematizzabili in quattro filoni tematici principali. Un primo gruppo di studi ha utilizzato il *biofeedback* psicofisiologico, basato su parametri quali la variabilità della frequenza cardiaca (HRV) e la risposta galvanica della pelle (GSR), come unico intervento finalizzato a migliorare aspetti tecnici o fisiologici della prestazione: Galloway (2011) nel tennis, Park e colleghi (2020) nello squash e nel tennis, ed Eskandarnejad e colleghi (2024) nel badminton. Un secondo gruppo ha impiegato il *biofeedback* elettromiografico (EMG) a supporto dell'allenamento neuromuscolare e fisico: Prończuck e colleghi (2025) e Gepfert e colleghi (2025), entrambi condotti su giocatori di badminton d'élite. Un terzo gruppo di studi ha combinato il *biofeedback* con altri interventi psicologici, quali la ristrutturazione cognitiva, tecniche di *mental training* e la *mindfulness*: Kim e colleghi (2024) nello squash, Makaraci e colleghi (2024) nel tennis e Behaein, Farsi, Franz e Lipowski (2025) nel tennistavolo. Infine, lo studio di Ahmed e colleghi (2022), condotto su giocatori di badminton, si distingue dagli altri per aver utilizzato il *biofeedback* non come intervento ma come strumento di misurazione, all'interno di un disegno trasversale di tipo correlazionale. La Tabella 1 riporta in forma sintetica le caratteristiche principali di ciascuno studio incluso, organizzate secondo i criteri di estrazione descritti nel paragrafo precedente.

Tabella 1. Sintesi degli studi inclusi nella revisione sistematica

Articolo	Campione	Paese	Obiettivi dello studio	Metodi e procedura	Risultati principali
Galloway, S. M. (2011)	6 tennisti junior d'élite, di età compresa tra i 13 e i 14 anni.	Western Canada	Lo studio si è proposto di migliorare ed estendere il <i>Wingate five-step approach</i> al <i>mental training</i> basato su <i>biofeedback</i> (BFB), valutandone l'efficacia sull'accuratezza del colpo del servizio nel tennis	Studio condotto in stagione primaverile, con tecniche psicologiche 4-5 volte/settimana e allenamento fisico 2-3 volte/settimana. Disegno single-subject, multi-element, basato sul Wingate five-step approach (baseline, 5 fasi con biofeedback, post-intervento), progressivamente da ambiente laboratoriale a campo realistico fino al match play in fase 5; sessioni di circa 40 minuti. Tecniche utilizzate: rilassamento di Jacobson, training autogeno di Schultz, VMBR, training di attivazione di Raiport, centering di Tohei, supportate da manuale e da dispositivi di biofeedback (Mind Peak Wave Rider Jr., Thought Technology GSR/Temp 2X e MyoTrac). Outcome: servizio nel tennis, valutato tramite 20 servizi (10 sx/10 dx) registrati con due videocamere e analizzati con Simio Motion Twin. Strumenti aggiuntivi: questionario post-sessione sull'uso delle abilità mentali e questionario post-intervento su validità sociale/rilevanza clinica (atleti e allenatori). Analisi: ispezione visiva (Martin & Pear, 1996) e affidabilità inter-osservatore tramite correlazione di Pearson.	L'allenamento con biofeedback ha migliorato la precisione del servizio, con l'effetto più marcato nelle fasi finali del programma; il partecipante con la performance iniziale più bassa ha ottenuto il maggiore incremento. Buona affidabilità delle misurazioni e ampia adesione alle abilità mentali insegnate, confermate anche dalla soddisfazione espressa da atleti e allenatori.
Park e colleghi (2020)	Il campione dello studio era composto da 8 atleti d'élite (3 uomini, 5 donne). 5 partecipanti erano giocatori di squash e 3 tennisti, di età compresa tra i 24 e 37 anni.	Corea del sud	Lo studio ha applicato e validato un programma di allenamento basato su <i>biofeedback</i> sulla variabilità della frequenza cardiaca (HRV), con l'obiettivo di aumentare l'equilibrio psicofisiologico degli atleti e, di conseguenza, la loro <i>performance</i> .	Misurazioni: HRV tramite sensore BVP al dito medio, frequenza respiratoria tramite fascia addominale, conduttanza cutanea (SCS) tramite elettrodi sull'indice e anulare. Programma di biofeedback HRV: 10 sessioni con 10 minuti di respirazione guidata a ritmo costante (5 sec inspirazione/5 sec espirazione, protocollo Lehrer et al. 2014) tramite sistema ProComp Infinit-8 Channel, seguendo una barra visiva a schermo; sessione 1 e 10 come pre/post-test, sessione 5 come metà intervento. Analisi: SPSS, medie e deviazioni standard, test di Wilcoxon con segno.	Il training di biofeedback HRV ha migliorato la regolazione psicofisiologica, con un incremento degli indici di variabilità cardiaca a bassa frequenza e una riduzione della frequenza respiratoria; non sono invece emersi cambiamenti a carico degli indici parasimpatici.

Prończuk e colleghi (2025)	24 atleti d'élite di badminton, provenienti da programmi di preparazione olimpica in Polonia. Con un'età media di 18 anni.	Polonia	Lo studio ha indagato gli effetti neuromuscolari di un <i>training</i> pliometrico sul ciclo di allungamento-accorciamento (SSC), della durata di 4 settimane, guidato da <i>feedback</i> elettromiografico (EMG) in tempo reale.	RCT a gruppi paralleli, misurazioni pre-post. Entrambi i gruppi hanno svolto lo stesso programma pliometrico SSC (12 sessioni, 4x5 depth jump da 30 cm, sovraccarico 15-20% BW, tempo di contatto <200 ms). Il gruppo sperimentale riceveva feedback EMG real-time (MyoMuscle 32 canali, vasto laterale/retto femorale/gluteo medio, soglia 30% MVC, refresh 10 ms, delay 50 ms); il controllo riceveva feedback sham preregistrato (blinding confermato, $\chi^2=1.73$, $p=0.19$). Misure: forza verticale (piattaforma Kistler 9286A, 1000 Hz), EMG di superficie (2048 Hz, elettrodi Ag/AgCl, standard SENIAM), latenza EMG (intervallo forza>15N–segnale EMG> ± 2.5 DS per ≥ 20 ms). Variabili: RSI, impulso, latenza/ampiezza EMG, asimmetrie bilaterali, tempi di contatto/volo. Analisi: PCA e LDA per gli adattamenti; Random Forest e MLP per predire la risposta post-intervento (Python/R).	Il gruppo sperimentale ha mostrato miglioramenti nella forza reattiva e nell'impulso verticale, con una riduzione delle latenze EMG dei principali muscoli coinvolti nel gesto di salto; nessun cambiamento nel gruppo di controllo. È emersa inoltre un'associazione tra il miglioramento della performance esplosiva e la riorganizzazione temporale neuromuscolare.
Kim e colleghi (2024)	Il campione del presente studio era composto da un'atleta di squash d'élite di livello nazionale, di genere femminile e 18 anni con sintomi di ansia competitiva.	Corea del sud	Lo studio ha verificato gli effetti di un programma d'intervento di 10 sessioni che combinava <i>biofeedback</i> sulla variabilità della frequenza cardiaca (HRV) e ristrutturazione cognitiva sulle abilità di autoregolazione dell'atleta.	Studio di caso singolo (raccolti dati demografici, di salute e sportivi). Il soggetto ha svolto 10 sessioni di laboratorio in off-season (20 min, 2 volte/settimana): misurazione dell'HRV in baseline (10 min respirazione naturale) e durante respirazione guidata con BFB, con rilevazione di stati psicologici (stress, sonno, umore) e fisiologici (frequenza cardiaca, temperatura, conduttanza cutanea, respirazione). Ogni sessione era seguita da 30 minuti di ristrutturazione cognitiva (approccio CBT) e da report qualitativi analizzati con content analysis. Componente domiciliare: uso del dispositivo Emwave 2 tre volte al giorno per respirazione guidata. Stato psicologico valutato pre/post con CSAI-2 e CERQ. Analisi: statistica descrittiva sulle variazioni pre-post di HRV e variabili psicologiche.	Il programma integrato di biofeedback HRV e ristrutturazione cognitiva ha ridotto l'ansia competitiva e migliorato l'autoregolazione psicofisiologica dell'atleta, con benefici confermati anche dai dati qualitativi in termini di maggiore consapevolezza corporea e migliore gestione dei pensieri negativi.
Ahmed e colleghi (2022)	36 giocatori professionisti di badminton, di genere maschile, senza infortuni avvenuti negli ultimi 6 mesi e nessun problema fisico e psicologico, con oltre 3 anni di esperienza.	India	Lo studio ha analizzato, con un disegno trasversale e correlazionale, la relazione tra la stabilità del <i>core</i> , misurata tramite <i>biofeedback</i> pressorio, ed alcuni fattori di <i>performance</i> nel badminton	Studio trasversale, con valutazione condotta in un'unica sessione per atleta: ogni test veniva ripetuto tre volte (media considerata ai fini analitici), con recupero di 4-5 minuti tra le prove per limitare l'affaticamento. La core stability è stata misurata con la Pressure Biofeedback Unit-Stabilizer™ (posizione supina, pressione iniziale 40 mmHg, manovra di hollowing associata a movimenti degli arti inferiori); l'equilibrio dinamico tramite lo Y Balance Test (punteggio composito medio normalizzato sulla lunghezza dell'arto); l'agilità con il T Test (tempo medio su tre prove); la potenza degli arti superiori con il Medicine Ball Throw da seduto, schiena a muro (distanza media di tre lanci, palla da 3 kg). Normalità	La core stability è risultata associata positivamente all'equilibrio dinamico e all'agilità, mentre non è emersa un'associazione con la potenza degli arti superiori.

			(equilibrio dinamico, agilità e potenza degli arti superiori.	dei dati verificata con Shapiro-Wilk; associazioni valutate tramite correlazione di Pearson. Analisi statistica: SPSS v.20, $p < 0,05$.	
Makaracı e colleghi (2024)	16 tennisti di livello internazionale (11 maschi e 5 femmine), con un'età compresa tra i 16 e i 18 anni e un'esperienza competitiva media di più di sette anni.	Turchia e Germania	Lo studio ha valutato l'effetto di dieci sessioni di <i>biofeedback</i> multimodale (BFB, Biofeedback) sulle funzioni fisiologiche, psicologiche e cognitive di tennisti internazionali.	RCT con assegnazione randomizzata (Excel). Il gruppo sperimentale ha svolto 10 sessioni individuali di biofeedback multimodale (NeXus-10 MKII + BioTrace+) in 4 settimane, 12 min ciascuna, strutturate in familiarizzazione, pratica (respirazione diaframmatica, imagery positiva, frasi autogene) e consolidamento; il gruppo controllo ha proseguito l'allenamento abituale. Outcome misurati: parametri fisiologici (HRV, sEMG, SCR, temperatura periferica), ansia competitiva (CSAI-2) e funzioni cognitive (d2-test, SCWT). Analisi statistica: MANOVA (SPSS v.28, $p < 0,05$).	Il gruppo sperimentale ha mostrato miglioramenti su tutti i domini rispetto al controllo: a livello fisiologico, aumento della skin temperature e riduzione della heart rate; a livello psicologico, riduzione dell'ansia e aumento della self-confidence; a livello cognitivo, miglioramenti in attenzione e controllo inibitorio. Il gruppo di controllo è invece peggiorato o rimasto invariato su tutte le misure.
Gepfert e colleghi (2025)	22 atleti junior d'élite di badminton, con età compresa tra i 15 e i 18 anni, tutti appartenenti al livello nazionale. I soggetti sono stati assegnati in modo randomizzato, in due gruppi di pari numerosità: gruppo sperimentale (n = 11) e gruppo di controllo (n = 11).	Polonia	Lo studio aveva l'obiettivo di analizzare l'efficacia di un programma di allenamento neuromuscolare con <i>biofeedback</i> (EMG), mirato alla riduzione delle asimmetrie tra gli arti inferiori in giovani atleti d'élite di badminton.	Trial controllato pre-post a due gruppi, con stratificazione per performance e randomizzazione a blocchi (EG vs CG). Entrambi i gruppi hanno svolto 12 sessioni in 4 settimane (3/settimana, ~40 min). L'EG ha seguito un programma neuromuscolare per la riduzione delle asimmetrie inter-arto (pliomètria unilaterale, salti da diverse altezze, esercizi reattivi, stabilizzazione monopodalica, con richieste cognitive aggiuntive), monitorato tramite EMG e sistemi optoelettronici per tempi di contatto/volo; il CG ha svolto un programma generale con pliomètria bilaterale, mobilità e core stability, senza feedback mirato. Misure: batteria di hop test su singolo arto (piattaforme di forza), altezza di salto, tempo di contatto/volo, RSI, asimmetrie inter-arto (% destra/sinistra) e due indici compositi sviluppati ad hoc. Analisi: test per campioni appaiati, ANOVA mista, correlazioni asimmetrie-performance, PCA, regressione LASSO, Random Forest e SVM per predire la risposta all'allenamento; $p < 0,05$ con correzione per confronti multipli.	Nessuna differenza tra i gruppi al baseline. Dopo l'intervento, il gruppo sperimentale ha mostrato miglioramenti in altezza di salto, forza reattiva e potenza di picco rispetto al controllo, che non ha mostrato cambiamenti. Le asimmetrie interarto non sono risultate correlate alla performance, ma gli atleti con maggiore asimmetria iniziale hanno mostrato i miglioramenti più marcati nella forza reattiva.
Behaein e colleghi (2025)	40 atleti maschi di tennistavolo di livello semi-professionistico, con un'età compresa tra i 14 e i 18 anni.	Iran	Lo studio ha esaminato gli effetti di <i>biofeedback</i> , <i>mindfulness</i> e della loro	Disegno pre-post a 4 gruppi (mindfulness, biofeedback, combinato, controllo). Valutazione iniziale su performance motoria (forehand flick nel tennistavolo, punteggio 1-5 assegnato da allenatore in cieco) e abilità psicologiche (OMSAT-3, versione iraniana, scala Likert a 7 punti: concentrazione, recupero della	I gruppi sperimentali sono migliorati in performance, concentrazione, recupero della concentrazione e risposta allo stress, mentre il controllo non ha mostrato cambiamenti. Il gruppo che ha ricevuto l'intervento combinato è risultato superiore a mindfulness e biofeedback presi

			combinazione sulla <i>performance</i> nel tennistavolo (accuratezza del <i>forehand flick</i>) e su alcune abilità psicologiche.	concentrazione, risposta allo stress). Interventi di 6 settimane (2 sessioni/settimana, 20-45 min): gruppo mindfulness con protocolli MSPE/MAC (respirazione consapevole, meditazione, body scan, stretching consapevole, mindful walking); gruppo biofeedback con regolazione fisiologica (frequenza di risonanza respiratoria, respirazione diaframmatica, monitoraggio FC/respiro con progressiva riduzione del feedback esterno); gruppo combinato con entrambi gli approcci nella stessa sessione; controllo con solo allenamento abituale. Tutti i gruppi hanno mantenuto la pratica normale di tennistavolo. Numerosità campionaria calcolata a priori (G-Power). Analisi: Shapiro-Wilk, Levene, Mixed ANOVA 4×2 (gruppi×tempo), t-test per campioni appaiati, ANOVA a una via, post-hoc Bonferroni (SPSS v.21, p<0.05).	singolarmente per performance e concentrazione, mentre per le altre due variabili i tre gruppi sperimentali si sono equivalsi, superando comunque il controllo.
Eskandarnejad e colleghi (2024).	Il campione era composto da giocatori di badminton di alto livello appartenenti alla squadra provinciale e ai campionati di lega. I partecipanti sono stati selezionati tramite campionamento intenzionale e successivamente assegnati in modo casuale a due gruppi: un gruppo sperimentale e un gruppo di controllo.	Iran	Lo studio ha analizzato l'efficacia di un <i>training</i> di <i>biofeedback</i> basato sulla variabilità della frequenza cardiaca (HRV) nel migliorare la prestazione sportiva e nel favorire una più consapevole regolazione dell'attivazione fisiologica.	Studio semi-sperimentale, disegno pre-post a due gruppi (randomizzazione non specificata come block-randomization). Il gruppo sperimentale ha svolto 10 sessioni di training HRV-biofeedback (inizialmente respirazione, poi regolazione della frequenza cardiaca); il gruppo di controllo ha proseguito l'allenamento sportivo abituale. Misure: attivazione fisiologica tramite risposta galvanica della pelle (Procomp 2), performance tramite Badminton French Test (pre e post). Analisi: ANCOVA (SPSS), con controllo delle differenze pre-test tra gruppi.	Il gruppo sperimentale ha mostrato miglioramenti nella performance sportiva e nei livelli di attivazione fisiologica (risposta galvanica della pelle) rispetto al gruppo di controllo, suggerendo un ruolo del training HRV-biofeedback nel favorire una maggiore consapevolezza e capacità di autoregolazione dell'attivazione negli atleti.

3.6.1 Aspetti metodologici

I nove studi inclusi nella presente revisione presentano disegni di ricerca eterogenei, che spaziano dal *randomized controlled trial* (RCT) allo studio di caso singolo, fino al disegno trasversale correlazionale. Cinque studi hanno adottato un disegno sperimentale a due o più gruppi con randomizzazione. Prończuk e colleghi (2025) hanno impiegato un RCT a due gruppi paralleli (sperimentale e *sham*), con randomizzazione a blocchi stratificata per sesso e per valore basale dell'indice di forza reattiva (RSI), assegnatori e valutatori post-test mantenuti in cieco rispetto all'assegnazione dei gruppi. Gepfert e colleghi (2025) hanno anch'essi utilizzato un disegno controllato pre-post a due gruppi con randomizzazione a blocchi, stratificata per livello di *performance*, sebbene il gruppo di controllo abbia svolto un programma pliometrico generale anziché una condizione *sham* vera e propria. Makaracı e colleghi (2024) hanno randomizzato i partecipanti tramite un foglio di calcolo Excel a un gruppo sperimentale e un gruppo di controllo che non riceveva alcun intervento, proseguendo l'allenamento abituale. Behaein e colleghi (2025) hanno adottato un disegno pre-post a quattro gruppi (*mindfulness*, *biofeedback*, tecniche combinate, controllo), con numerosità campionaria calcolata a priori tramite software G-Power (Faul *et al.*, 2007, cit. in Behaein *et al.*, 2025). Eskandarnejad e colleghi (2024), infine, hanno impiegato un disegno semi-sperimentale a due gruppi, con campionamento intenzionale iniziale seguito da assegnazione casuale ai due bracci, analizzando i dati tramite ANCOVA per controllare le differenze di partenza tra i gruppi. Due studi si distinguono per l'adozione di un disegno a soggetto singolo. Galloway (2011) ha utilizzato un disegno *multi-element* a soggetto singolo (*single-subject*), articolato in una fase di baseline, cinque fasi di intervento secondo il *Wingate five-step approach* e una fase post-intervento, con un sesto partecipante utilizzato come controllo per gli effetti di maturazione e allenamento, poiché non poteva prendere parte al programma intensivo nella stessa fase degli altri. Kim e colleghi (2024) hanno anch'essi adottato un disegno di caso singolo, applicato a un'unica atleta, articolato in dieci sessioni di intervento combinato con misurazioni pre e post-test. Gli ultimi due studi si discostano da un impianto propriamente sperimentale. Park e colleghi (2020) hanno condotto uno studio pilota privo di gruppo di controllo, con un disegno a un solo gruppo e misurazioni pre e post-intervento. Ahmed e colleghi (2022), infine, hanno impiegato un disegno trasversale di tipo correlazionale, con una singola sessione di valutazione per ciascun atleta, senza alcuna componente di intervento longitudinale. Per quanto riguarda la durata degli interventi, questa varia considerevolmente tra gli studi: si va dalla singola sessione di valutazione di Ahmed e colleghi (2022) alle dieci sessioni distribuite su circa due-cinque settimane di Park e colleghi (2020), Kim e colleghi (2024) e Makaracı e colleghi (2024), fino alle quattro settimane di Prończuk e colleghi (2025) e Gepfert e colleghi (2025), alle sei settimane di Behaein e colleghi (2025) e, all'estremo opposto, al programma di

Galloway (2011), che si è protratto per l'intera stagione agonistica, articolandosi in una *baseline* e cinque fasi di durata comparabile, ciascuna di dodici sessioni. Sul piano statistico, gli studi hanno impiegato sia tecniche parametriche sia non parametriche, scelte in funzione della distribuzione dei dati e della numerosità campionaria: test t per campioni appaiati e indipendenti, ANOVA a misure ripetute e mixed ANOVA, ANCOVA, test di Wilcoxon per ranghi con segno e correlazione di Pearson. Due studi, quelli di Prończuk e colleghi (2025) e di Gepfert e colleghi (2025), hanno inoltre integrato tecniche di machine learning, rispettivamente *Random Forest* e *Multilayer Perceptron*, e *Random Forest* e *Support Vector Machine*, per predire la risposta individuale all'intervento a partire dagli indici raccolti nella fase precedente al trattamento.

3.6.2 Caratteristiche dei campioni

I campioni analizzati nei nove studi differiscono sensibilmente per numerosità, livello competitivo, composizione di genere e provenienza geografica. Sul piano della numerosità, si osserva un'ampia variabilità: dal caso singolo di Kim e colleghi (2024), che ha coinvolto un'unica atleta, fino ai 40 partecipanti di Behaein e colleghi (2025), passando per i 6 tennisti di Galloway (2011), gli 8 atleti di Park e colleghi (2020), i 16 tennisti di Makaracı e colleghi (2024), i 22 atleti di badminton di Gepfert e colleghi (2025), i 24 atleti di badminton di Prończuk e colleghi (2025) e i 36 giocatori di badminton di Ahmed e colleghi (2022). Per quanto riguarda la composizione di genere, la maggioranza degli studi ha coinvolto campioni misti o esclusivamente maschili. Galloway (2011) ha reclutato esclusivamente tennisti di genere maschile, così come Ahmed e colleghi (2022) e Behaein e colleghi (2025) con i rispettivi campioni di giocatori di badminton e tennistavolo. Park e colleghi (2020) hanno invece incluso un campione a prevalenza femminile (5 donne e 3 uomini), mentre Makaracı e colleghi (2024) hanno reclutato un campione a prevalenza maschile (11 uomini e 5 donne). Kim e colleghi (2024) hanno condotto lo studio su un'unica atleta di genere femminile. Gepfert e colleghi (2025) e Prończuk e colleghi (2025) non specificano la composizione di genere del campione, mentre Eskandarnejad e colleghi (2024) non riportano un dettaglio esplicito in tal senso. Il livello competitivo dei partecipanti è generalmente elevato in tutti gli studi, sebbene con declinazioni diverse. Diversi lavori hanno reclutato atleti definiti *élite* o di livello nazionale/internazionale: i tennisti *junior* nazionali canadesi di Galloway (2011), gli atleti d'*élite* coreani di Park e colleghi (2020), gli atleti di badminton di livello nazionale polacchi di Prończuk e colleghi (2025) e di Gepfert e colleghi (2025), questi ultimi definiti *junior d'élite* e classificati tra i primi venti atleti a livello nazionale nella propria categoria d'età, e in fine tennisti internazionali di Makaracı e colleghi (2024), con punteggi *International Tennis Number* (ITN) compresi tra 4 e 6. Anche l'atleta di Kim e colleghi (2024) rappresentava la nazionale coreana di squash. Ahmed e colleghi (2022) hanno invece definito

“professionisti” i giocatori reclutati, richiedendo comunque almeno tre anni di esperienza e la partecipazione a competizioni di livello distrettuale. Eskandarnejad e colleghi (2024) hanno selezionato atleti di alto livello appartenenti alla squadra provinciale e ai campionati di lega, mentre Behaein e colleghi (2025) hanno reclutato atleti di livello semi-professionistico. Le fasce d'età coperte dagli studi comprendono sia campioni adolescenziali sia adulti. Galloway (2011) ha reclutato atleti tra i 13 e i 14 anni, Makaracı e colleghi (2024) tra i 16 e i 18 anni (età media $17,31 \pm 0,87$), Gepfert e colleghi (2025) tra i 15 e i 18 anni, Behaein e colleghi (2025) tra i 14 e i 18 anni e Prończuk e colleghi (2025) con un'età media di $18,1 \pm 0,7$ anni. Park e colleghi (2020) hanno invece reclutato atleti adulti, con un'età compresa tra i 24 e i 37 anni (media $28,37 \pm 4,02$) e un'esperienza agonistica media di $13,75 \pm 0,82$ anni. Ahmed e colleghi (2022) hanno reclutato un campione adulto con età media di $21,19 \pm 1,95$ anni. Kim e colleghi (2024) hanno lavorato con un'atleta diciottenne. Sul piano geografico, gli studi sono stati condotti in un'ampia varietà di contesti nazionali: Canada occidentale (Galloway, 2011), Corea del Sud (Park *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2024), Polonia (Prończuk *et al.*, 2025; Gepfert *et al.*, 2025), India (Ahmed *et al.*, 2022), Turchia e Germania (Makaracı *et al.*, 2024), Iran (Behaein *et al.*, 2025; Eskandarnejad *et al.*, 2024). Questa distribuzione geografica ampia suggerisce un interesse internazionale diffuso per l'applicazione del *biofeedback* agli sport di racchetta, non circoscritto a un singolo contesto culturale o sportivo nazionale.

3.6.3 Variabili e costrutti indagati

I costrutti indagati nei nove studi possono essere ricondotti a quattro macro-categorie, spesso presenti in combinazione all'interno dello stesso lavoro: variabili fisiologiche, variabili psicologiche, variabili cognitive e variabili motorio-prestative. Sul versante fisiologico, la variabilità della frequenza cardiaca (HRV) rappresenta il costrutto più ricorrente. Park e colleghi (2020) hanno analizzato sia il dominio del tempo (SDNN, RMSSD) sia il dominio della frequenza (LF, HF, rapporto LF/HF), insieme alla frequenza respiratoria. Kim e colleghi (2024) hanno adottato la medesima distinzione tra dominio del tempo e della frequenza per l'HRV, mentre Makaracı e colleghi (2024) hanno ampliato il set di variabili fisiologiche includendo, oltre all'HRV (RMSSD, SDNN, frequenza cardiaca), anche l'attività elettromiografica di superficie (sEMG) sul muscolo frontale, la risposta di conduttanza cutanea (SCR) e la temperatura periferica della pelle. Eskandarnejad e colleghi (2024) si sono invece concentrati sulla risposta galvanica della pelle come indice di attivazione fisiologica. Un filone distinto riguarda l'elettromiografia applicata al dominio neuromuscolare: Prończuk e colleghi (2025) hanno misurato la latenza e l'ampiezza EMG di vasto laterale, retto femorale e gluteo medio, insieme a impulso verticale, tempo di contatto e indice di forza reattiva (RSI), mentre Gepfert e colleghi (2025) hanno analizzato un set concettualmente affine: altezza di salto, RSI, potenza di picco, *stiffness*

attiva, affiancandovi due indici compositi sviluppati ad hoc, il *Force Efficiency Ratio* (FER) e l'*Asymmetry Impact Index* (AII), oltre alle asimmetrie interarto calcolate su impulso, forza media e *rate of force development* in fase di atterraggio. Sul versante psicologico, il costrutto più indagato è l'ansia competitiva, quasi sempre misurata tramite il *Competitive State Anxiety Inventory-2* (CSAI-2) nelle sue tre sottoscale di ansia cognitiva, ansia somatica e autostima: questo strumento è stato impiegato sia da Kim e colleghi (2024) sia da Makaracı e colleghi (2024). Kim e colleghi (2024) hanno inoltre valutato le strategie di regolazione delle emozioni tramite il Cognitive Emotion Regulation Questionnaire (CERQ), che ne distingue nove componenti, tra cui rimuginazione, autocolpevolizzazione, catastrofizzazione e rivalutazione positiva. Behaein e colleghi (2025) hanno invece impiegato la versione iraniana dell'*Ottawa Mental Skills Assessment Tool* (OMSAT-3), incentrata su concentrazione, recupero della concentrazione e risposta allo *stress*. Sul versante cognitivo, Makaracı e colleghi (2024) rappresentano l'unico studio della revisione a indagare direttamente funzioni cognitive quali l'attenzione sostenuta, tramite il *d2-test* (velocità di elaborazione, errori, percentuale di errore, prestazione di concentrazione), e il controllo inibitorio, tramite lo *Stroop Color-Word Test*. Sul versante motorio-prestativo, infine, ciascuno studio ha adottato misure specifiche per la propria disciplina e per l'obiettivo dell'intervento. Galloway (2011) ha misurato l'accuratezza del servizio nel tennis attraverso un sistema di videoregistrazione e analisi del movimento. Eskandarnejad e colleghi (2024) hanno impiegato il *Badminton French Test* per valutare la performance sportiva generale. Behaein e colleghi (2025) hanno valutato l'accuratezza del *forehand flick* nel tennistavolo tramite punteggio assegnato da un allenatore in cieco rispetto alla condizione sperimentale. Ahmed e colleghi (2022) hanno infine indagato un insieme di costrutti motori correlati tra loro, la stabilità del *core*, misurata tramite *biofeedback* pressorio, l'equilibrio dinamico tramite lo *Y Balance Test*, l'agilità tramite il *T Test* e la potenza degli arti superiori tramite il lancio della palla medica senza che nessuno di essi fosse oggetto di un intervento, ma unicamente di una misurazione trasversale.

3.6.4 Interventi con *biofeedback* come tecnica singola

3.6.4.1 *Biofeedback* psicofisiologico (HRV/GSR)

Galloway (2011)

Lo studio di Galloway (2011) si è posto l'obiettivo di estendere e verificare l'efficacia del *Wingate five-step approach to mental training incorporating biofeedback*, sviluppato da Blumenstein e colleghi (1997, cit. in Galloway, 2011), applicandolo per la prima volta in modo sistematico all'accuratezza del servizio nel tennis. Il campione era costituito da sei tennisti *junior d'élite* di livello

nazionale canadese, di età compresa tra i 13 e i 14 anni, selezionati sulla base di criteri specifici, tra cui: l'interesse per un percorso di *mental training* a lungo termine, la disponibilità a svolgere compiti domestici sulle abilità mentali e l'assenza di percorsi paralleli di psicologia dello sport. Questi sono stati reclutati nel periodo immediatamente successivo ai campionati nazionali *indoor* giovanili. Il disegno adottato era di tipo *single-subject, multi-element* (Martin & Pear, 1996, cit. in Galloway, 2011), con una fase di *baseline* preliminare. L'unica eccezione all'interno del campione, è stata applicata al sesto partecipante, che ha svolto la funzione di controllo per gli effetti di maturazione e allenamento, poiché non poteva essere incluso nel programma intensivo nella medesima fase degli altri atleti e ha ricevuto l'intervento più avanti nella stagione. La variabile dipendente era rappresentata dall'accuratezza del servizio, misurata attraverso una batteria standardizzata di venti servizi (dieci per lato, cinque verso l'area larga e cinque verso il centro), videoregistrata con due telecamere e analizzata tramite il *software Simio Motion Twin*; l'affidabilità inter-osservatore, calcolata tramite correlazione di Pearson tra allenatori e un arbitro di tennis provinciale, si è attestata tra il 90,4% e il 97,5%, superiore alla soglia dell'80% indicata come accettabile da Kazdin (1982, cit. in Galloway, 2011). L'intervento si è articolato nelle cinque fasi previste dal modello originario: introduzione, identificazione, simulazione, trasformazione e realizzazione, ciascuna composta da dodici sessioni distribuite su quattro giorni a settimana, per un totale complessivo che ha coperto l'intera stagione agonistica primaverile-estiva. Le tecniche psicologiche impiegate comprendevano il rilassamento progressivo di Jacobson, il *training* autogeno di Schultz, la *visual motor behavioral rehearsal* (VMBR) di Suinn, il *training* di attivazione di Raiport e la tecnica di *centering* di Tohei (cit. in Galloway, 2011), supportate da dispositivi di *biofeedback* per il monitoraggio di elettromiografia, risposta galvanica della pelle, temperatura cutanea e frequenza cardiaca (*Mind Peak Wave Rider Jr. e Thought Technology GSR/Temp 2X e MyoTrac*). Le prime tre fasi si sono svolte in un ufficio lontano dal campo da tennis, mentre le fasi quattro e cinque hanno previsto l'uso di dispositivi di *biofeedback* portatili direttamente nell'ambiente di allenamento e, nella fase conclusiva, in un contesto di gara. I risultati individuali, analizzati tramite ispezione visiva dei dati (Martin e Pear, 1996, cit. in Galloway, 2011), hanno mostrato un miglioramento complessivo dell'accuratezza del servizio in cinque dei sei partecipanti, con incrementi compresi tra +0,91 e +4,62 servizi su venti rispetto alla *baseline*; il partecipante con la *performance* iniziale più bassa (5,28/20) ha ottenuto il maggiore incremento assoluto, mentre il partecipante con la *performance* iniziale più alta (11,66/20) ha mostrato un andamento più discontinuo, verosimilmente condizionato da un effetto "soffitto" (*ceiling effect*, Franklin, Allison e Gorman, 1996, cit. in Galloway, 2011). Il sesto partecipante, utilizzato come controllo, ha invece mostrato un andamento casuale nel corso dello studio e un peggioramento netto (-0,31) nel confronto tra un periodo di *baseline* di lunghezza comparabile e la fase post-intervento. A

livello di gruppo, il passaggio dalla *baseline* alla prima fase ha rappresentato l'unico momento in cui tutti i partecipanti hanno mostrato un peggioramento della propria accuratezza (media di gruppo -1,56), un dato che l'autore riconduce al disagio provato dagli atleti nell'apprendere l'uso della strumentazione in un ambiente non familiare e distante dal campo da tennis, coerentemente con quanto sostenuto da Anderson e Bushman (1997, cit. in Galloway, 2011) circa i limiti di validità esterna degli ambienti di laboratorio. Il passaggio dalla prima alla seconda fase ha invece prodotto il maggiore incremento di gruppo (+2,48), l'unico caso in cui tutti i partecipanti hanno migliorato rispetto alla fase precedente, un *pattern* che Galloway (2011) attribuisce alla crescente familiarità con la strumentazione e con le abilità mentali acquisita nel corso delle prime dodici sessioni, e che l'autore avvicina a quanto riportato da Bar-Eli e Blumenstein (2004, cit. in Galloway, 2011) in uno studio su studenti di educazione fisica impegnati in prove di velocità. Le fasi successive hanno mostrato andamenti più eterogenei tra i singoli partecipanti, con un lieve calo di gruppo nel passaggio dalla quarta alla quinta fase (-0,12), fase in cui l'allenamento si è spostato nel contesto di gara vero e proprio, e un nuovo lieve incremento (+0,92) nel confronto tra la quinta fase e il periodo post-intervento. Nel complesso, la differenza tra *baseline* e post-intervento è stata pari a +2,76 servizi di gruppo, corrispondente a un incremento di circa tre servizi su venti. I risultati del *self-regulation test* (SRT), applicato nelle prime quattro fasi, hanno confermato che il gruppo è riuscito a modulare con successo le diverse modalità fisiologiche monitorate (frequenza cardiaca, risposta galvanica della pelle, temperatura), con percentuali di successo elevate sia nella condizione di riposo sia in quelle di attivazione e rilassamento. I dati di validità sociale, raccolti tramite questionario post-studio secondo il formato proposto da Wolf (1978, cit. in Galloway, 2011), hanno mostrato punteggi elevati su scala Likert a cinque punti sia per gli atleti: importanza del servizio ($M = 4,6$), importanza della consistenza ($M = 4,4$), gradimento del programma ($M = 4,4$) e soddisfazione per i risultati ($M = 4,6$); sia per gli allenatori, nonostante entrambi i tecnici coinvolti abbiano segnalato la durata complessiva del programma come aspetto da rivedere. I controlli di manipolazione hanno infine mostrato un utilizzo delle abilità mentali insegnate nell'84% delle sessioni durante lo studio e nel 76% dei casi nel periodo post-intervento, con un utilizzo domiciliare della strumentazione di *biofeedback* rispettivamente dell'89% e del 65%. Nella propria discussione, Galloway (2011) sottolinea come l'aumento nell'accuratezza del servizio osservato lungo la maggior parte delle fasi supporti l'efficacia del *Wingate five-step approach* nel contesto specifico del tennis giovanile d'élite, calcolando una dimensione dell'effetto media dell'intervento pari al 78% di efficienza tramite il metodo della percentuale di dati non sovrapposti (percentage of non-overlapping data points) (Galloway, 2011), un valore che l'autore giudica superiore alla media del 61,62% riscontrata in una metanalisi di trenta studi a soggetto singolo nell'ambito della psicologia dello sport (Galloway *et al.*, 2006, cit. in

Galloway, 2011); questo dato viene collegato dall'autore anche all'indicazione di Weinberg e Comar (1994, cit. in Galloway, 2011), secondo cui la durata media di un intervento psicologico efficace dovrebbe estendersi tra i tre e i sei mesi. L'autore conclude che il programma può rappresentare uno strumento praticabile per il miglioramento dell'accuratezza del servizio in tennisti *junior d'élite*, sottolineando in particolare la relativa stabilità della *performance* nella fase post-intervento come indicatore della capacità degli atleti di mantenere autonomamente i benefici acquisiti anche in assenza del supporto diretto dello psicologo dello sport.

Park e colleghi (2020)

Lo studio di Park, Hwang e Lee (2020) è uno studio pilota che si è proposto di applicare e validare un programma di training basato sul *biofeedback* della variabilità della frequenza cardiaca (HRV *biofeedback*) in un campione di atleti praticanti sport di racchetta, con l'obiettivo di verificarne l'efficacia nel migliorare l'equilibrio psicofisiologico. Il campione era composto da otto atleti d'élite sudcoreani (cinque giocatori di squash e tre di tennis; tre uomini e cinque donne), con un'età media di 28,37 anni (DS = 4,02) e un'esperienza agonistica media di 13,75 anni (DS = 0,82); la frequenza cardiaca a riposo media del gruppo era pari a 66,62 battiti al minuto (DS = 7,67). Il disegno adottato era privo di un gruppo di controllo, con misurazioni raccolte prima e dopo un programma di dieci sessioni di *training*, ciascuna della durata di 20-30 minuti, distribuite cinque volte a settimana, secondo il protocollo di respirazione ritmata proposto da Lehrer e colleghi (2013, cit. in Park *et al.*, 2020): cinque secondi di inspirazione seguiti da cinque secondi di espirazione, guidati da una barra di respirazione visualizzata a schermo tramite il sistema *ProComp Infinit-8 Channel Biofeedback System (Thought Technology)*. I sensori impiegati includevano un rilevatore di volume di sangue periferico (*blood volume pulse*) posizionato sul dito medio, una fascia respiratoria addominale e sensori di conduttanza cutanea posizionati sull'indice e anulare. La struttura del protocollo prevedeva un *pre-test* nella prima sessione, un *test* intermedio nella quinta sessione e un *post-test* nella decima, con sessioni di respirazione guidata di dieci minuti nelle restanti otto. Le variabili misurate comprendevano gli indici HRV nel dominio del tempo: deviazione standard degli intervalli normali (SDNN) e radice quadrata della media dei quadrati delle differenze successive (RMSSD); nel dominio della frequenza: potenza a bassa frequenza (LF), ad alta frequenza (HF), il rapporto tra le due (LF/HF), e la frequenza respiratoria; queste variabili sono state analizzate tramite il *test di Wilcoxon* per ranghi con segno (SPSS 18.0). I risultati hanno mostrato un aumento significativo della SDNN, passata da 73,89 (DS = 22,76) a 116,16 ms² (DS = 23,74; $p = 0,017$), e un aumento non significativo della RMSSD, da 64,99 a 86,34 ms² ($p = 0,093$). Nel dominio della frequenza, la LF è aumentata in modo significativo da 496,09 a 3508,93 ms² ($p = 0,012$), mentre l'HF è aumentata da 531,48 a 676,82

ms² senza raggiungere la significatività statistica ($p = 0,779$); il rapporto LF/HF è aumentato in modo significativo da 1,33 a 7,99 ($p = 0,012$), mentre la frequenza respiratoria è diminuita significativamente da 14,99 a 7,09 respiri al minuto ($p = 0,012$). Nella discussione dei propri risultati, gli autori interpretano l'aumento della SDNN come indicatore di un incremento della variabilità cardiaca complessiva, associandolo a un miglioramento dello stato psicofisiologico degli atleti coerente con quanto riscontrato da Ortega e Wang (2018, cit. in Park *et al.*, 2020) in un gruppo di tiratori di livello superiore rispetto ai pari. L'aumento della LF e del rapporto LF/HF, generalmente associato a un incremento dell'attivazione simpatica, viene invece interpretato dagli autori non come segnale di *stress* negativo bensì come indicatore di un maggiore livello di concentrazione durante l'esercizio di *biofeedback* (Jiménez Morgan e Molina Mora, 2017, cit. in Park *et al.*, 2020), un pattern che gli autori avvicinano a quanto osservato da Kim e colleghi (2019, cit. in Park *et al.*, 2020) in tiratori con arco durante il tiro rispetto al riposo, e da Murray e Raedeke (2008, cit. in Park *et al.*, 2020) in golfisti che eseguivano il *putt* in presenza di pubblico. Gli autori riconoscono che tale risultato appare in apparente contraddizione con l'associazione teorica tradizionale tra bassa HRV/aumento della LF e risposta negativa allo *stress* (Kim *et al.*, 2017; Morales *et al.*, 2019, cit. in Park *et al.*, 2020), ma sottolineano come esso sia coerente con quanto già riportato in altri studi di HRV *biofeedback* applicati ad atleti: un aumento complessivo di HRV e LF accompagnato da una diminuzione della HF è stato infatti osservato anche da Lagos e colleghi (2008, cit. in Park *et al.*, 2020) in una golfista universitaria, e da Dziembowska e colleghi (2016, cit. in Park *et al.*, 2020) in un gruppo sperimentale di 41 atleti maschi sani, a fronte dell'assenza di cambiamenti nel gruppo di controllo. Gli autori spiegano tale fenomeno con il fatto che la respirazione ritmata a bassa frequenza, tipica dei protocolli di HRV *biofeedback* (Lehrer e colleghi, 2003, cit. in Park *et al.*, 2020), può determinare una sovrapposizione tra le bande di frequenza HF e LF, con un conseguente rischio di errata interpretazione della potenza LF (Park *et al.*, 2020). Nel complesso, gli autori concludono che il programma di *training* abbia contribuito a migliorare la capacità degli atleti di regolare la propria respirazione e il proprio stato psicofisiologico, fornendo risultati empirici preliminari utili ad ampliare la ricerca sull'HRV *biofeedback* nei programmi di potenziamento della *performance* sportiva.

Eskandarnejad e colleghi (2024)

Lo studio di Eskandarnejad e colleghi (2024) si è proposto di verificare l'efficacia di un programma di training basato sul *biofeedback* HRV, nel migliorare la performance sportiva e la regolazione dell'attivazione fisiologica in giocatori di badminton, misurata tramite la risposta galvanica della pelle. Il campione era costituito da venti giocatori di badminton di alto livello, selezionati tra gli atleti della squadra provinciale e dei campionati di lega, tramite campionamento intenzionale seguito da

un'assegnazione casuale a due gruppi di dieci partecipanti ciascuno, uno sperimentale e l'altro di controllo. Il disegno adottato era di tipo semi-sperimentale, con misurazioni raccolte prima e dopo l'intervento. Il livello di attivazione è stato valutato tramite la risposta galvanica della pelle, rilevata con il dispositivo Procomp 2, mentre i cambiamenti nella performance sono stati misurati tramite il Badminton French Test, somministrato sia nella fase di pre-test sia in quella di post-test. Il gruppo sperimentale ha svolto dieci sessioni di training di HRV biofeedback, articolate inizialmente su esercizi di respirazione e, successivamente, sul controllo diretto della frequenza cardiaca, mentre il gruppo di controllo ha proseguito la propria routine di allenamento abituale. I dati sono stati analizzati tramite analisi della covarianza (ANCOVA), utile a controllare le eventuali differenze di partenza tra i due gruppi. I risultati hanno mostrato un miglioramento significativo, nel gruppo sperimentale rispetto al gruppo di controllo, in tutte e tre le variabili indagate: il colpo lungo (long shot, $p = 0,001$), il servizio corto (short service, $p = 0,001$) e la risposta galvanica della pelle ($p = 0,001$). Gli autori interpretano tali risultati come evidenza dell'utilità del training di HRV biofeedback nel migliorare la performance dei giocatori di badminton e nel favorire una regolazione più consapevole del proprio livello di attivazione fisiologica durante la competizione. Nella propria discussione, Eskandarnejad e colleghi (2024) richiamano il tema della relazione tra livello di attivazione (arousal) e performance, riferendosi in particolare alla teoria secondo cui ogni atleta disporrebbe di un proprio intervallo ottimale di attivazione, specifico per il compito motorio e per il contesto ambientale, entro il quale si colloca la prestazione di picco (Nemeth e Ballou, 2020, cit. in Eskandarnejad et al., 2024), suggerendo che il miglioramento osservato nel gruppo sperimentale sia riconducibile a una maggiore capacità di avvicinarsi a tale intervallo ottimale grazie al training di biofeedback. Gli autori concludono sottolineando la necessità di ulteriori studi di conferma per approfondire tali risultati preliminari.

3.6.4.2 Biofeedback elettromiografico (EMG)

Prończuk e colleghi (2025)

Lo studio di Prończuk e colleghi (2025) ha esaminato gli effetti neuromeccanici di un programma di *training* pliometrico sul ciclo di allungamento-accorciamento (*stretch-shortening cycle*, SSC), guidato da *feedback* elettromiografico (EMG) in tempo reale, in giovani atleti d'*élite* di badminton, con l'obiettivo aggiuntivo di sviluppare modelli predittivi in grado di identificare precocemente i soggetti maggiormente responsivi al *training*. Il campione era costituito da ventiquattro atleti *junior* di livello nazionale (età media $18,1 \pm 0,7$ anni; esperienza di allenamento $6,3 \pm 1,1$ anni), classificati tra i primi venti atleti a livello nazionale nella propria categoria d'età e impegnati in competizioni internazionali del *Badminton Europe* o dalla BWF, reclutati tramite centri di allenamento olimpico accreditati. I partecipanti sono stati randomizzati a blocchi, distribuiti per sesso e per valore basale

dell'indice di forza reattiva (RSI): Il gruppo sperimentale (EG, n=12) riceveva il *feedback* elettromiografico reale, mentre il gruppo di controllo (CG, n = 12), svolgeva lo stesso allenamento ricevendo però un *feedback* non autentico, costruito a partire da tracciati muscolari preregistrati su altri atleti e adattati al livello di forza di ciascun partecipante, così da apparire credibili. Questo accorgimento serviva a evitare che gli atleti del gruppo di controllo si accorgessero di non ricevere un'informazione reale sui propri muscoli, garantendo così che l'unica vera differenza tra i due gruppi fosse la natura del *feedback* ricevuto, e non una diversa motivazione o consapevolezza durante l'allenamento; associata a questa variabile, al termine dell'ultima sessione è stato somministrato un questionario di credibilità che non ha rilevato differenze significative nella capacità dei due gruppi di distinguere tra le due condizioni ($p = 0,19$). Il protocollo di allenamento si è articolato in dodici sessioni distribuite su quattro settimane (tre sessioni a settimana), ciascuna comprendente quattro serie di cinque *depth jump* da una pedana di 30 cm, con sovraccarico esterno progressivo (15% della massa corporea nelle prime due settimane, 20% nelle ultime due) applicato tramite giubbotto zavorrato. Durante l'esecuzione, il gruppo sperimentale riceveva *feedback* elettromiografico visivo in tempo reale su vasto laterale (VL), retto femorale (RF) e gluteo medio (GM), con l'obiettivo di minimizzare il tempo di contatto al suolo (< 200 ms) e massimizzare l'indice di forza reattiva (RSI). I segnali di forza di reazione al suolo sono stati rilevati tramite una doppia piattaforma di forza (Kistler 9286A, 1000 Hz), mentre i segnali elettromiografici di superficie sono stati registrati a 2048 Hz secondo le linee guida SENIAM (Hermens *et al.*, 2000, cit. in Prończuk *et al.*, 2025) e normalizzati rispetto alla contrazione volontaria massima. La latenza EMG è stata operazionalmente definita come l'intervallo temporale tra il contatto iniziale al suolo e il momento in cui l'ampiezza EMG rettificata superava $\pm 2,5$ deviazioni standard rispetto alla condizione di riposo per almeno 20 ms, un criterio coerente con quanto proposto in studi precedenti (de Brito *et al.*, 2022; Grooms *et al.*, 2017, cit. in Prończuk *et al.*, 2025). I risultati hanno mostrato, nel gruppo sperimentale, una riduzione significativa della latenza EMG in tutti e tre i muscoli monitorati ($p < 0,05$), un aumento significativo dell'indice di forza reattiva (+13,4%; $p = 0,014$) e del rapporto di impulso P2/P1 ($p = 0,027$), oltre a una riduzione significativa del tempo necessario a raggiungere il picco di forza ($p = 0,032$); nessuna di queste variazioni è stata osservata nel gruppo di controllo. L'analisi delle componenti principali (PCA) è stata condotta su centodue variabili neuromeccaniche ed elettromiografiche normalizzate. Ne sono emerse due componenti principali, in grado di spiegare insieme il 78,3% della varianza totale. La prima componente (29,4% della varianza) raggruppava soprattutto indici di potenza concentrica come RSI, impulso verticale e altezza di volo; la seconda (19,1%) rifletteva invece la latenza EMG di vasto laterale e retto femorale. Proiettando i singoli atleti in questo spazio a due componenti, il gruppo sperimentale post-intervento risultava parzialmente separato dagli altri lungo la prima e la terza

componente. Per verificare quanto queste componenti riuscissero effettivamente a distinguere i gruppi, gli autori hanno applicato un'analisi discriminante lineare (LDA) sugli stessi dati ridotti dalla PCA. L'accuratezza di classificazione ottenuta è stata del 26%, di poco superiore al livello di casualità per quattro gruppi. L'area sotto la curva ROC (AUC) è risultata pari a 0,72, un valore che indica una capacità di separazione tra i gruppi moderata, quindi migliore di quanto suggerisse la sola accuratezza. Un'ulteriore analisi esplorativa, condotta con un algoritmo di *clustering* non supervisionato (*k-means*, con tre gruppi predefiniti) sulle stesse variabili ridotte, ha mostrato che diciassette dei ventidue atleti del gruppo sperimentale post-intervento si raggruppavano in un unico *cluster*, mentre gli atleti restanti si mescolavano con i profili pre-intervento e di controllo in due *cluster* meno definiti. Osservando invece l'andamento nel tempo delle dodici sessioni del gruppo sperimentale, emerge un miglioramento progressivo dell'indice di forza reattiva (+13,4%; $p < 0,01$) e dell'impulso concentrico (+11,9%; $p < 0,05$), insieme a una riduzione del tempo necessario per raggiungere il picco di forza (-7,8%; $p < 0,05$). Questo andamento segue una curva quasi logaritmica ($p < 0,001$), con i guadagni che si stabilizzano dopo la nona sessione. Infine, gli autori hanno addestrato due modelli di *machine learning*: *Random Forest* e *Multilayer Perceptron*, sulle componenti estratte dalla PCA, con l'obiettivo di prevedere, già dalle prime sessioni, quali atleti avrebbero risposto meglio al *training*. Nel modello *Random Forest*, le variabili più utili per la previsione sono risultate l'indice di forza reattiva, il rapporto di impulso P2/P1 e la stabilità del tempo di contatto. Nella propria discussione, gli autori interpretano la riduzione della latenza elettromiografica come segno di un controllo motorio *feedforward* più efficiente e di un reclutamento più ottimizzato delle unità motorie (Prończuk *et al.*, 2025). Sottolineano inoltre che i miglioramenti nella forza reattiva e nei parametri di impulso non sono stati accompagnati da un aumento della forza di picco: un dato che, secondo gli autori, suggerisce come questi miglioramenti riflettano adattamenti neurali e di coordinazione tra i muscoli, più che un semplice aumento della forza muscolare (Prończuk *et al.*, 2025). Concludono che il *training* SSC guidato da *feedback* EMG favorisca un adattamento neuromeccanico rilevante negli atleti d'élite, e che le tecniche di *machine learning* e di riduzione della dimensionalità possano aiutare a individuare precocemente i cambiamenti nella *performance*, pur richiedendo una validazione su gruppi più ampi e diversificati.

Gepfert e colleghi (2025)

Lo studio di Gepfert e colleghi (2025) ha indagato l'impatto di un intervento di quattro settimane mirato alla riduzione delle asimmetrie funzionali tra gli arti inferiori sulla *performance* di salto monopodale (*single-leg hop*) in giovani atleti d'élite di badminton, esaminando al contempo se indici compositi di asimmetria potessero predire la responsività individuale al *training*. Il campione era

costituito da ventidue atleti di livello nazionale (età 15-18 anni), randomizzati a blocchi in un gruppo sperimentale (EG, $n = 11$), che ha svolto un *training* neuromeccanico con *feedback* elettromiografico (EMG), e un gruppo di controllo (CG, $n = 11$), che ha seguito un programma di esercizi pliometrici generali; la stratificazione della randomizzazione ha tenuto conto di età, sesso, massa corporea, dominanza dell'arto e parametri basali di salto, così da garantire la comparabilità tra i due gruppi. Il protocollo del gruppo sperimentale prevedeva dodici sessioni, distribuite su tre volte a settimana per quattro settimane, ciascuna di circa quaranta minuti, comprendenti salti pliometrici unilaterali monitorati tramite elettrodi di superficie posizionati su vasto laterale e gastrocnemio mediale (Noraxon DTS, 1000 Hz), *depth jump* asimmetrici da altezze variabili (20-40 cm) con misurazione del tempo di contatto e dell'indice di forza reattiva tramite sistema optoelettronico (OptoJump), esercizi pliometrici reattivi con stimoli uditivi randomizzati, salti monopodali con mantenimento della posizione (*hop-and-hold*) e infine esercizi isometrici di equalizzazione della forza con sensori di forza bilaterali (Loadsol), con *feedback* di asimmetria istantaneo. Il gruppo di controllo ha svolto un programma di volume e durata comparabili, comprendente salti bilaterali generali, esercizi di mobilità e stabilizzazione del core, con elettrodi EMG applicati ma non utilizzati come *feedback* reale, presentati ai partecipanti come procedura di "calibrazione tecnica" per mantenere parzialmente in cieco la reale finalità dell'intervento; i valutatori del post-test erano anch'essi mantenuti in cieco rispetto all'assegnazione ai gruppi. Le variabili misurate tramite una doppia piattaforma di forza (Bertec, 1000 Hz) comprendevano impulso, tempo al picco di forza, forza di picco, *rate of force development* (RFD) in fase di atterraggio, forza media, tempo di volo e di contatto, altezza di salto, indice di forza reattiva (RSI) e *stiffness* attiva. Le asimmetrie bilaterali sono state calcolate come differenza percentuale assoluta tra arto sinistro e destro secondo il metodo raccomandato da Bishop e colleghi (2020, cit. in Gepfert *et al.*, 2025), mentre due indici compositi sono stati sviluppati ad hoc: il *Force Efficiency Ratio* (FER), rapporto tra tempo al picco di forza e impulso, e l'*Asymmetry Impact Index* (AII), rapporto tra altezza di salto e asimmetria media di forza e impulso. I risultati non hanno mostrato differenze significative tra i gruppi alla condizione basale per nessuna variabile. Dopo l'intervento, il gruppo sperimentale ha mostrato miglioramenti significativi nell'altezza di salto ($p = 0,030$), nell'indice di forza reattiva ($p = 0,012$) e nella potenza di picco ($p = 0,028$), mentre il gruppo di controllo non ha mostrato variazioni significative in nessuna delle misure di *performance*, confermando l'ipotesi di un effetto specifico dell'intervento (H4). Il confronto tra gruppi al *post-test* ha inoltre evidenziato differenze significative nell'altezza di salto ($p = 0,001$; $d = 0,74$) e nell'indice di forza reattiva ($p = 0,001$; $d = 0,90$) a favore del gruppo sperimentale, oltre a un valore di FER significativamente più basso nel gruppo sperimentale rispetto al controllo ($p = 0,031$; $d = -0,46$), indicativo di una maggiore efficienza nella produzione di forza. Le analisi correlazionali condotte

sull'intero campione non hanno confermato le ipotesi di partenza (H1-H3), secondo cui le asimmetrie tra i due arti avrebbero dovuto associarsi negativamente alla *performance*: atleti con maggiore squilibrio tra arto destro e sinistro avrebbero dovuto, secondo l'ipotesi originaria, mostrare risultati funzionali peggiori. I dati raccolti non hanno però confermato questa aspettativa in nessuna delle tre relazioni esaminate. L'asimmetria di impulso non è risultata legata all'altezza di salto, l'asimmetria di *rate of force development* (RFD) rilevata in fase di atterraggio non è risultata legata alla *stiffness* attiva ($r = -0,05$), e l'asimmetria di forza media non è risultata legata all'indice di forza reattiva ($r = 0,02$). In tutti e tre i casi, il coefficiente di correlazione ottenuto è rimasto ben al di sotto della soglia di 0,3, comunemente utilizzata in ambito biomeccanico come limite minimo per poter parlare di una relazione degna di attenzione. Proprio per approfondire ulteriormente questo risultato inatteso, gli autori hanno provato un secondo approccio, dividendo gli atleti in due sottogruppi sulla base del grado di asimmetria mostrato: un sottogruppo ad alta asimmetria e uno a bassa asimmetria, utilizzando come soglia di separazione il 10% sull'asimmetria di impulso. Anche in questo caso, con questa diversa strategia di analisi, non sono emerse differenze significative, né aspetti rilevanti, tra i due sottogruppi in nessuna delle variabili funzionali prese in esame: gli atleti classificati come ad alta asimmetria non hanno mostrato, una *performance* peggiore rispetto al gruppo che presentava più simmetria. Di fronte a questo doppio esito negativo, i ricercatori hanno tentato una terza via, spostando l'attenzione dalle singole variabili di asimmetria prese isolatamente a un'analisi congiunta dell'intero insieme di dati. Attraverso un'analisi delle componenti principali, condotta sul dataset normalizzato di tutte le variabili di asimmetria disponibili, sono state estratte due componenti principali, ciascuna rappresentante una combinazione lineare delle variabili originarie, in grado di spiegare insieme il 73,1% della varianza complessiva osservata nel campione. La prima di queste due componenti risultava legata soprattutto all'asimmetria di impulso e di forza media, mentre la seconda rifletteva principalmente l'asimmetria di RFD in fase di atterraggio e quella nel tempo necessario per raggiungere il picco di forza. Queste due componenti sono state successivamente inserite come possibili variabili predittive all'interno di un modello di regressione LASSO, con l'obiettivo di verificare se, combinate tra loro, riuscissero a predire l'indice di forza reattiva meglio di quanto non facessero le singole variabili di asimmetria prese separatamente. Anche questo tentativo, però, non ha prodotto risultati utili: nessuna delle due componenti si è rivelata un predittore significativo, confermando ulteriormente la difficoltà di collegare in modo lineare le asimmetrie interarto alla *performance* funzionale degli atleti. Questo esito ha spinto i ricercatori, nella fase successiva dell'analisi, ad abbandonare i modelli statistici di tipo lineare a favore di tecniche di classificazione non lineare, ritenute più adatte a cogliere eventuali relazioni complesse tra le variabili che i metodi precedenti non erano riusciti a evidenziare. È stato così costruito un modello *Random Forest*, con

l'obiettivo specifico di distinguere, sulla base dei soli dati raccolti prima dell'inizio del *training*, gli atleti che avrebbero risposto meglio all'intervento, definiti *responder*, da quelli con una risposta più contenuta. Come variabili predittive sono stati utilizzati i due indici compositi sviluppati appositamente per lo studio, il *Force Efficiency Ratio* (FER) e l'*Asymmetry Impact Index* (AII), entrambi misurati in fase pre-intervento. Non essendo disponibili soglie tradizionali in grado di distinguere in modo netto un *responder* da un *non-responder*, gli autori hanno adottato un criterio alternativo, dividendo gli atleti in base alla mediana dei guadagni individuali osservati nell'indice di forza reattiva. Data la ridotta dimensione del campione, il modello è stato valutato tramite una tecnica di convalida incrociata chiamata *leave-one-out* (LOOCV), particolarmente indicata proprio nei casi in cui il numero di soggetti disponibili è limitato. Il risultato ottenuto — un'area sotto la curva ROC pari a 0,50, corrisponde esattamente al valore atteso in caso di previsione del tutto casuale, indicando quindi che il modello non è stato in grado di distinguere realmente i due profili di atleti a partire dai soli indici FER e AII. Anche la matrice di confusione, che riassume il numero di previsioni corrette e sbagliate prodotte dal modello, ha confermato questo limite, mostrando una quantità pressoché identica di casi classificati correttamente e in modo errato. Infine, un modello a effetti misti lineari (LMM) ha rivelato un'interazione significativa a tre vie tra gruppo, tempo e classe di asimmetria per l'indice di forza reattiva ($p = 0,017$), indicando che gli atleti del gruppo sperimentale con asimmetria inizialmente più elevata hanno mostrato i maggiori guadagni di *performance* in seguito all'intervento. Nella propria discussione, gli autori interpretano il miglioramento della forza reattiva e della potenza di picco come coerente con la letteratura precedente sull'efficacia del *training* mirato alla riduzione delle asimmetrie nel migliorare l'esplosività degli arti inferiori (Bishop *et al.*, 2020; Guan *et al.*, 2022, cit. in Gepfert *et al.*, 2025), sottolineando inoltre come la riduzione del coefficiente di variazione per RSI e altezza di salto nel gruppo sperimentale rifletta una maggiore consistenza e un migliore controllo motorio acquisito dopo il *training*. Gli autori concludono che l'assenza di associazioni significative tra le metriche tradizionali di asimmetria e gli esiti funzionali evidenzia la necessità di approcci multidimensionali e individualizzati nella diagnostica atletica e nell'ottimizzazione del *training*, specialmente in sport soggetti ad asimmetria come il badminton.

3.6.5 Interventi di *biofeedback* combinato ad altri metodi psicologici

3.6.5 Interventi di *biofeedback* combinato ad altri metodi psicologici

Kim e colleghi (2024)

Lo studio di Kim e colleghi (2024) ha indagato gli effetti di un programma psicofisiologico integrato, comprendente *biofeedback* della variabilità della frequenza cardiaca (HRV BFB) e ristrutturazione

cognitiva (*cognitive restructuring*, CR), sulle abilità di autoregolazione di un'atleta di squash diciottenne, rappresentante della nazionale coreana, indicata con lo pseudonimo "Jenny". La partecipante presentava, nell'anno precedente allo studio, episodi di ansia in contesti competitivi, tra cui difficoltà respiratorie, vertigini, tachicardia, sudorazione e timore di perdita di coscienza durante le gare, non riconducibili, secondo un controllo medico preliminare, a cause fisiologiche, bensì a convinzioni disfunzionali legate alla competizione e a una scarsa coordinazione psicofisica in situazioni di stress. Il disegno adottato era uno studio di caso singolo, scelto dagli autori per consentire un'analisi approfondita e specifica della risposta individuale, sebbene a scapito della generalizzabilità dei risultati. Il programma si è articolato in dieci sessioni, condotte due volte a settimana nella stagione di riposo agonistico, ciascuna della durata di venti minuti nello stesso ambiente e allo stesso orario. Ogni sessione era strutturata in due fasi consecutive: un primo momento di HRV *biofeedback*, durante il quale la partecipante veniva dotata di biosensori (sistema *Peak Performance Suite*, elettrodi collegati a un *encoder Biograph ProComp* Infiniti a 8 canali, *Thought Technology*) posizionati su mano sinistra e addome, con una prima fase di dieci minuti di respirazione naturale per la rilevazione della *baseline*, seguita da dieci minuti di respirazione addominale guidata da una barra a schermo (inspirazione dal naso, espirazione dalla bocca), finalizzata a regolare gli stati psicofisiologici; un secondo momento, della durata di circa trenta minuti, dedicato alla ristrutturazione cognitiva secondo un impianto derivato dalla terapia cognitivo-comportamentale di Beck (1988, cit. in Kim *et al.*, 2024), articolato in tre fasi: consapevolezza, valutazione degli errori cognitivi quali l'ipergeneralizzazione, il pensiero dicotomico, la personalizzazione e la catastrofizzazione, e ricerca di interpretazioni alternative. Alla partecipante è stato inoltre fornito un dispositivo portatile (*Emwave 2*, *HeartMath*) per lo svolgimento domiciliare di esercizi di respirazione guidata tre volte al giorno. Al termine di ogni sessione, la partecipante ha risposto a tre domande aperte relative agli aspetti positivi, negativi e a eventuali cambiamenti insoliti percepiti a livello corporeo, emotivo e cognitivo, analizzate tramite *content analysis*. Le misure quantitative comprendevano gli indici HRV nel dominio del tempo (SDNN, RMSSD) e della frequenza (potenza LF e HF, rapporto LF/HF), oltre a due questionari psicologici somministrati prima e dopo l'intervento: il *Competitive State Anxiety Inventory-2* (CSAI-2) (Martens *et al.*, 1990, cit. in Kim *et al.*, 2024), articolato nelle sottoscale di ansia somatica, ansia cognitiva e autostima, e il *Cognitive Emotion Regulation Questionnaire* (CERQ) (Garnefski *et al.*, 2002, cit. in Kim *et al.*, 2024), che ne distingue nove componenti tra cui rimuginazione, autocolpevolizzazione, accettazione e rivalutazione positiva. I risultati hanno mostrato, al termine dell'intervento, un aumento sia della SDNN (da 336,87 a 339,53 ms²) sia della RMSSD (da 648,17 a 652,91 ms²), quest'ultima considerata indice di attivazione parasimpatica; nel dominio della frequenza, la potenza LF normalizzata è aumentata (da 59,03 a 70,30) mentre la potenza HF

normalizzata è diminuita (da 40,80 a 29,58), con un conseguente aumento del rapporto LF/HF da 1,97 a 3,80. Sul piano psicologico, i punteggi CSAI-2 hanno mostrato una riduzione dell'ansia somatica (da 28 a 23) e dell'ansia cognitiva (da 23 a 15), accompagnata da un aumento dell'autostima di stato (da 19 a 24). I punteggi CERQ hanno mostrato un incremento nelle strategie adattive, quali: mettere in prospettiva (da 7 a 11), rifocalizzazione sulla pianificazione (da 14 a 16), rifocalizzazione positiva (da 9 a 12), rivalutazione positiva (da 14 a 17) e accettazione (da 12 a 18); continuando con una riduzione nelle strategie disadattive di autocolpevolizzazione (da 19 a 17) e catastrofizzazione (da 20 a 12). Sul piano qualitativo, l'atleta ha riportato, nel corso delle sessioni, un progressivo miglioramento nella percezione di controllo sulle proprie reazioni fisiologiche allo stress, associandolo esplicitamente alla pratica di *biofeedback*: già dalla terza sessione ha descritto una maggiore leggerezza percepita e consapevolezza della propria capacità di autocontrollo, mentre nelle sessioni successive ha riferito un miglioramento della qualità del sonno, un cambiamento positivo del proprio *pattern* respiratorio quotidiano e, dall'ottava sessione in avanti, l'assenza dei problemi respiratori che caratterizzavano il periodo precedente allo studio. Relativamente alla componente di ristrutturazione cognitiva, la partecipante ha riferito di aver acquisito, per la prima volta, strategie specifiche per modificare i propri pensieri negativi, riuscendo a individuare prospettive alternative e maggiore fiducia nella propria capacità di regolazione emotiva, con ricadute percepite anche sulla fiducia nella propria capacità di gioco. Nella propria discussione, gli autori interpretano l'aumento di SDNN e RMSSD come indicatore di un miglior equilibrio del sistema nervoso autonomo, coerente con quanto riportato da Lagos e colleghi (2008, cit. in Kim *et al.*, 2024) e da Mueller e colleghi (2020, cit. in Kim *et al.*, 2024) in atlete sottoposte a *training* di HRV *biofeedback*, e con i risultati di Gross e colleghi (2017, cit. in Kim *et al.*, 2024), che avevano osservato un aumento della RMSSD e della fiducia psicologica in una tiratrice d'*élite* dopo un *training* di *biofeedback* a frequenza di risonanza. L'aumento congiunto di LF e del rapporto LF/HF, a fronte di una riduzione della HF, viene descritto dagli autori come apparentemente in contrasto con l'interpretazione teorica tradizionale, secondo cui una LF elevata sarebbe associata a un'maggiore attivazione simpatica e quindi a stress (Kim *et al.*, 2017), ma coerente con risultati analoghi riportati da Lagos e colleghi (2008, cit. in Kim *et al.*, 2024) e da Dziembowska e colleghi (2016, cit. in Kim *et al.*, 2024), che gli autori attribuiscono alla sovrapposizione tra le bande di frequenza HF e LF indotta dalla respirazione lenta e ritmata tipica dei protocolli di *biofeedback*. Per quanto riguarda la componente cognitiva, gli autori collegano la riduzione della catastrofizzazione e dell'ansia cognitiva ai risultati di Beck e colleghi (1992, cit. in Kim *et al.*, 2024), che avevano riscontrato una maggiore efficacia della terapia cognitiva focalizzata rispetto a un trattamento supportivo generico nella riduzione dei sintomi di ansia in pazienti con disturbo di panico, e ai risultati di Salkovskis e colleghi (1991, cit. in Kim *et al.*, 2024), secondo cui

la correzione delle interpretazioni catastrofiche delle sensazioni corporee riduce i sintomi ansiosi. Gli autori concludono che la combinazione di HRV *biofeedback* e ristrutturazione cognitiva sembra favorire cambiamenti positivi nell'autoregolazione, con potenziali benefici per gli atleti nella gestione dello stato psicologico e nel miglioramento della *performance* competitiva, pur segnalando la necessità di ulteriori studi su campioni più ampi per rafforzare la validità dei risultati.

Makaraci e colleghi (2024)

Lo studio di Makaraci e colleghi (2024) ha indagato gli effetti di dieci sessioni di *biofeedback* multimodale sul funzionamento fisiologico, psicologico e cognitivo di tennisti di livello internazionale, con l'obiettivo di verificare se la capacità di autoregolazione appresa tramite il *biofeedback* si traducesse in una riduzione dell'ansia e in un miglioramento delle funzioni cognitive. Il campione era costituito da sedici tennisti internazionali (undici maschi e cinque femmine), con un'età media di 17,31 anni (DS = 0,87) ed esperienza agonistica media di 7,19 anni (DS = 1,38), affiliati a un'accademia di tennis professionistica e classificati tra il livello 4 (avanzato) e il livello 6 (intermedio) secondo l'*International Tennis Number* (ITN). I partecipanti sono stati randomizzati, tramite un foglio di calcolo *Excel*, in un gruppo sperimentale (n = 8: cinque maschi, tre femmine), che ha ricevuto dieci sessioni di *biofeedback* multimodale distribuite su quattro settimane, e un gruppo di controllo (n = 8: sei maschi, due femmine), che non ha ricevuto alcun intervento, proseguendo la normale *routine* di allenamento. Ogni sessione, della durata di dodici minuti, si è svolta in una stanza dell'accademia tra le 13 e le 15. Prima dell'inizio del programma, i partecipanti del gruppo sperimentale avevano svolto, per una settimana, esercizi di respirazione diaframmatica per venti minuti al giorno, oltre a ricevere una breve istruzione su *imagery* positiva e pratiche autogene, al fine di potenziare l'efficacia delle sessioni successive. Il protocollo utilizzava un dispositivo non invasivo (NeXus-10 MKII) e il relativo *software* (BioTrace+), monitorando simultaneamente quattro parametri fisiologici: variabilità della frequenza cardiaca (HRV), tramite sensore di volume di sangue periferico sul dito indice e fascia respiratoria toracica), attività elettromiografica di superficie (sEMG) sul muscolo frontale tramite elettrodi Ag/AgCl, risposta di conduttanza cutanea (SCR) tramite elettrodi posizionati sulle dita della mano non dominante, e temperatura periferica della pelle (SKT) tramite sensore sul terzo dito della mano dominante, con l'obiettivo di mantenere la temperatura ad almeno 30°C. Ogni sessione era articolata in tre fasi: una prima fase di tre minuti dedicata alla familiarizzazione con la strumentazione, una fase centrale in cui i partecipanti, mentre praticavano la respirazione diaframmatica e visualizzavano un luogo sereno tramite *imagery* positiva, ricevevano *feedback* in tempo reale attraverso musica, fotografie, videogiochi o scene naturali rilassanti presentati in ordine casuale, elaborando frasi autogene personalizzate (ad esempio "sono

completamente calmo" o "le mie mani sono calde"); una fase conclusiva di tre minuti dedicata a fornire informazioni sui benefici della pratica appena svolta. Le variabili psicologiche sono state misurate tramite il *Competitive State Anxiety Inventory-2* (CSAI-2; Martens *et al.*, 1990, cit. in Makaracı *et al.*, 2024), articolato nelle sottoscale di ansia cognitiva, ansia somatica e autostima, mentre le funzioni cognitive sono state valutate tramite il *d2-test* per l'attenzione sostenuta (Brickenkamp e Oosterveld, 2012, cit. in Makaracı *et al.*, 2024), con i parametri di velocità di elaborazione (TN), errori (E), percentuale di errore (E%) e prestazione di concentrazione (CP) e lo *Stroop Color-Word Test* per il controllo inibitorio, inteso come una delle funzioni esecutive centrali secondo il modello di Diamond (2013, cit. in Makaracı *et al.*, 2024). I risultati fisiologici hanno mostrato un effetto principale significativo del tempo ($p = 0,011$), con un aumento significativo della temperatura periferica della pelle e una riduzione significativa della frequenza cardiaca; l'interazione gruppo per tempo è risultata significativa unicamente per la temperatura periferica ($p = 0,002$), con un aumento significativo confermato dai *test post-hoc* solo nel gruppo sperimentale ($p = 0,002$). Sul piano psicologico, l'interazione gruppo per tempo è risultata significativa per tutte e tre le sottoscale del CSAI-2: nel gruppo sperimentale, l'ansia cognitiva ($p = 0,013$) e l'ansia somatica ($p < 0,001$) sono diminuite significativamente, mentre l'autostima è aumentata significativamente ($p = 0,005$); nel gruppo di controllo, al contrario, l'ansia cognitiva ($p = 0,008$) e l'ansia somatica ($p < 0,001$) sono aumentate significativamente, mentre l'autostima è diminuita significativamente ($p = 0,001$). Sul piano cognitivo, l'interazione gruppo per tempo è risultata significativa per tutti i parametri considerati: nel gruppo sperimentale la velocità di elaborazione è aumentata ($p = 0,002$), gli errori sono diminuiti ($p = 0,005$), così come la loro percentuale ($p = 0,006$), la prestazione di concentrazione è aumentata ($p < 0,001$) e l'effetto *Stroop* è diminuito ($p < 0,001$); nessuna di queste variazioni è risultata significativa nel gruppo di controllo. Nella propria discussione, gli autori collegano l'aumento della temperatura periferica a una riduzione dello stato di stress (Yoon *et al.*, 2016, cit. in Makaracı *et al.*, 2024) e interpretano il miglioramento simultaneo su tutte le sottoscale del CSAI-2 come indicativo della capacità del *biofeedback* di agire sia sulla componente somatica sia su quella cognitiva dell'ansia, quest'ultima probabilmente favorita da un miglioramento della capacità di concentrazione acquisita durante le sessioni, sostenuta a livello neurale dall'attivazione di risorse coinvolte nel controllo attentivo e nella regolazione emotiva (Gaume *et al.*, 2016, cit. in Makaracı e colleghi, 2024). Per quanto riguarda i risultati cognitivi, gli autori li avvicinano a quanto riportato da Rusciano e colleghi (2017, cit. in Makaracı *et al.*, 2024) in calciatori d'élite sottoposti a *biofeedback* autonomico integrato, e concludono che il programma multimodale abbia mostrato, per la prima volta in tennisti internazionali, un effetto positivo simultaneo su fisiologia, ansia e prestazione cognitiva, sottolineando come tale approccio olistico possa rappresentare uno strumento utile per il

miglioramento della *performance* atletica e del benessere generale, pur segnalando la necessità di verificare in studi futuri se tali miglioramenti si traducano in un reale beneficio nella prestazione di gara.

Behaein e colleghi (2025)

Lo studio di Behaein e colleghi (2025) si è posto l'obiettivo di confrontare l'efficacia di un percorso di *biofeedback*, di *mindfulness* e della loro combinazione sulla *performance* nel tennistavolo e su alcune abilità psicologiche di giovani atleti semi-professionisti. Il campione era costituito da quaranta giocatori maschi di età compresa tra i 14 e i 18 anni, selezionati e successivamente randomizzati in quattro gruppi da dieci partecipanti ciascuno: gruppo *mindfulness* (età media $15,80 \pm 1,47$), gruppo *biofeedback* ($16,33 \pm 1,50$), gruppo combinato ($15,90 \pm 1,22$) e gruppo controllo ($16,30 \pm 1,49$), con una numerosità campionaria calcolata a priori tramite *software G-Power*. Tutti i partecipanti avevano un'esperienza di gioco compresa tra tre e cinque anni ed erano destrimani secondo l'*Edinburgh Handedness Questionnaire*. Il compito motorio oggetto di valutazione era il *forehand flick*, colpo avanzato considerato fondamentale per i giocatori di livello superiore, la cui accuratezza è stata giudicata da un allenatore della nazionale, mantenuto in cieco rispetto all'appartenenza di gruppo dei partecipanti, tramite un sistema a cinque posizioni bersaglio su tavolo regolamentare. Gli interventi si sono protratti per sei settimane, con due sessioni settimanali di durata progressivamente crescente (venti minuti nella prima settimana, trenta nella seconda, quarantacinque dalla terza alla sesta), mentre il gruppo di controllo ha proseguito la sola pratica abituale del tennistavolo. Il protocollo di *mindfulness*, derivato dai modelli *Mindful Sport Performance Enhancement* (MSPE) (Holguín-Ramírez *et al.*, 2020, cit. in Behaein *et al.*, 2025) e *Mindfulness-Acceptance-Commitment* (MAC) (Gardner e Moore, 2007, cit. in Behaein *et al.*, 2025), prevedeva un percorso progressivo che includeva respirazione consapevole, *body scan*, *stretching* consapevole, *mindful walking* e l'applicazione delle abilità apprese direttamente durante la pratica sportiva, articolato in una sessione settimanale in presenza dell'istruttore e una seconda svolta autonomamente a domicilio. Il protocollo di *biofeedback*, anch'esso derivato dalla letteratura precedente (de Bruin *et al.*, 2016; Lin *et al.*, 2021, cit. in Behaein *et al.*, 2025), prevedeva l'identificazione della frequenza di risonanza cardiorespiratoria individuale tramite la sperimentazione di diversi ritmi di respirazione (da 4,5 a 6,5 respiri al minuto), seguita da un percorso progressivo di familiarizzazione con la respirazione diaframmatica, *training di biofeedback* su frequenza cardiaca e respirazione con progressiva riduzione del *feedback* visivo esterno, fino a esercizi conclusivi sul controllo delle variazioni massime e minime della frequenza cardiaca. Il gruppo combinato ha svolto entrambi i protocolli all'interno della stessa sessione, con metà dei partecipanti che eseguiva prima gli esercizi di *mindfulness* e

successivamente quelli di *biofeedback*, e l'altra metà nell'ordine inverso. Le abilità psicologiche di concentrazione, recupero della concentrazione e risposta allo stress sono state misurate tramite la versione iraniana validata dell'*Ottawa Mental Skills Assessment Tool* (OMSAT-39) (Monfared, 2006, cit. in Behaein *et al.*, 2025), su scala Likert a sette punti. I risultati, analizzati tramite ANOVA mista 4×2 (gruppo × tempo), hanno mostrato per la *performance* del *forehand flick* un effetto principale significativo sia del tempo ($p < 0,001$) sia del gruppo ($p < 0,001$), oltre a un'interazione significativa tra i due fattori ($p < 0,001$). I successivi test t per campioni appaiati hanno confermato un aumento significativo della performance in tutti e tre i gruppi sperimentali ($p \leq 0,001$), assente invece nel gruppo di controllo ($p = 0,23$); il confronto post-hoc ha inoltre mostrato che il gruppo combinato ha ottenuto una performance significativamente superiore rispetto sia al gruppo *mindfulness* sia al gruppo *biofeedback* presi singolarmente ($p \leq 0,001$ in entrambi i casi), mentre questi ultimi due non si sono differenziati significativamente tra loro ($p = 0,19$). Un pattern analogo è emerso per la concentrazione ($p < 0,001$), l'interazione tempo×gruppo ($p < 0,001$), con il gruppo combinato superiore ai due gruppi sperimentali singoli ($p \leq 0,001$) e nessuna differenza tra questi ultimi ($p = 0,20$). Per il recupero della concentrazione, l'effetto principale di gruppo non ha raggiunto la significatività ($p = 0,06$), nonostante l'interazione tempo×gruppo sia risultata significativa ($p < 0,001$), in questo caso, il confronto post-hoc non ha rilevato differenze significative tra il gruppo di controllo e i gruppi *mindfulness* o *biofeedback* singolarmente considerati, mentre il gruppo combinato ha mostrato un recupero della concentrazione significativamente superiore rispetto a tutti gli altri tre gruppi ($p \leq 0,001$). Per la risposta percepita allo stress, infine, tutti e tre i gruppi sperimentali hanno mostrato una riduzione significativa rispetto alla baseline ($p \leq 0,001$), a fronte dell'assenza di variazioni nel gruppo di controllo ($p = 0,57$), senza tuttavia differenze significative tra i tre gruppi sperimentali tra loro ($p > 0,05$), pur risultando tutti superiori al controllo ($p \leq 0,001$). Nella propria discussione, gli autori interpretano i miglioramenti osservati nel gruppo *biofeedback* come riconducibili a una maggiore consapevolezza corporea e a una riduzione dell'ansia, che favorirebbe una prevalenza dell'attività del sistema nervoso parasimpatico su quello simpatico, con conseguente ottimizzazione delle funzioni fisiche, cognitive e psicologiche implicate nella prestazione motoria (Prinsloo *et al.*, 2011, cit. in Behaein *et al.*, 2025); tale processo di autoregolazione, una volta appreso tramite il dispositivo di *biofeedback*, potrebbe proseguire anche in assenza della strumentazione (Blumenstein *et al.*, 2014, cit. in Behaein *et al.*, 2025). Per quanto riguarda la *mindfulness*, gli autori la collegano alla capacità di dirigere l'attenzione al momento presente riducendo l'interferenza di elementi distraenti, permettendo un più rapido recupero della concentrazione dopo un'interruzione (Behaein *et al.*, 2025), e richiamano inoltre ricerche secondo cui pratiche di questo tipo inciderebbero sullo spessore della materia grigia cerebrale, con benefici sull'apprendimento, la memoria e la

regolazione emotiva (Behaein *et al.*, 2025). Riguardo alla superiorità del gruppo combinato, gli autori la attribuiscono a un effetto additivo delle due tecniche su processi complementari: la consapevolezza corporea e fisiologica da un lato e l'uso efficace delle risorse cognitive e attentive dall'altro, sottolineando come l'unione dei due approcci non sembri aver sovraccaricato i partecipanti, e concludendo che la combinazione di *biofeedback* e *mindfulness* rappresenti, per la prima volta dimostrato nel tennistavolo, un percorso più efficace rispetto all'uso isolato delle singole tecniche, sia per la componente prestativa sia per quella psicologica.

3.6.6 Biofeedback come strumento di misurazione non interventistico

Ahmed e colleghi (2022)

Lo studio di Ahmed e colleghi (2022) si distingue dagli altri otto studi inclusi nella presente revisione per l'assenza di una componente di intervento longitudinale: si tratta infatti di uno studio trasversale di tipo correlazionale, volto a indagare la relazione tra la stabilità del *core* e alcuni elementi prestativi tipici del badminton, quali: equilibrio dinamico, agilità e potenza degli arti superiori; utilizzando il *biofeedback* pressorio non come tecnica di allenamento bensì come strumento di misurazione. Il campione era costituito da trentasei giocatori professionisti di badminton di genere maschile, con un'età media di 21,19 anni (DS = 1,95), un'altezza media di 171,75 cm (DS = 6,50), un peso medio di 68,69 kg (DS = 9,00) e un indice di massa corporea medio di 23,28 kg/m² (DS = 2,76); i criteri di inclusione richiedevano almeno tre anni di esperienza agonistica, la partecipazione a competizioni di livello quantomeno distrettuale e l'assenza di infortuni nei sei mesi precedenti allo studio, mentre erano esclusi i soggetti con condizioni muscoloscheletriche acute o patologie neurologiche, cardiache o respiratorie. La stabilità del core è stata misurata tramite la *Stabilizer Pressure Biofeedback Unit* (Chattanooga), un dispositivo che rileva movimenti incontrollati del rachide lombare durante l'esecuzione di movimenti degli arti inferiori: un cuscino pneumatico veniva posizionato sotto il rachide lombare del partecipante in posizione supina e gonfiato a 40 mmHg, dopodiché il soggetto era invitato a eseguire la manovra di *hollowing* addominale e a mantenere una variazione di pressione inferiore a 10 mmHg durante il successivo movimento degli arti inferiori (Jung *et al.*, 2014, cit. in Ahmed *et al.*, 2022), con il livello più alto raggiunto in tre prove utilizzato ai fini analitici. L'equilibrio dinamico è stato valutato tramite lo *Y Balance Test*, calcolando un punteggio composito normalizzato sulla lunghezza dell'arto a partire dalla media delle direzioni anteriore, postero-mediale e postero-laterale; l'agilità è stata misurata tramite *l'agility T test* (Mackenzie, 2008, cit. in Ahmed *et al.*, 2022), cronometrando il tempo medio di tre prove in un percorso che richiede spostamenti laterali e cambi di direzione; la potenza degli arti superiori è stata invece valutata tramite il lancio di una palla medica

da 3 kg in posizione seduta, con schiena appoggiata alla parete, misurando la distanza media di tre lanci dallo sterno al primo punto di contatto della palla. L'intera batteria di test è stata eseguita nell'ordine: equilibrio, agilità, lancio della palla medica, stabilità del core, con recuperi di quattro-cinque minuti tra una prova e l'altra per limitare l'affaticamento; la normalità della distribuzione dei dati è stata verificata tramite il test di Shapiro-Wilk, e le associazioni tra le variabili sono state analizzate tramite il coefficiente di correlazione di Pearson (soglia di significatività a 0,05). I risultati hanno mostrato un tempo medio *all'agility T test* di 11,23 secondi (DS = 1,37), una distanza media di *reach* allo *Y Balance Test* di 97,51 cm (DS = 8,29) per l'arto destro e 97,81 cm (DS = 9,12) per il sinistro, e una distanza media al lancio della palla medica di 4,29 metri (DS = 0,49). Le analisi correlazionali hanno evidenziato un'associazione positiva e significativa tra la stabilità del *core* e l'equilibrio dinamico, sia per l'arto destro ($r = 0,460$; $p = 0,005$) sia per il sinistro ($r = 0,460$; $p = 0,005$), e un'associazione negativa e significativa tra la stabilità del core e il tempo *all'agility T test* ($r = -0,579$; $p < 0,001$), indicando che punteggi più elevati di stabilità del *core* si associavano a tempi più brevi nel test di agilità. La correlazione tra la stabilità del *core* e la potenza degli arti superiori, misurata tramite il lancio della palla medica, è risultata positiva ma di entità modesta e priva di significatività statistica ($r = 0,269$; $p = 0,113$). Nella propria discussione, gli autori collegano l'associazione positiva tra stabilità del *core* ed equilibrio dinamico al ruolo dei muscoli del *core* nel fornire una base stabile di supporto durante i movimenti degli arti inferiori e superiori, un risultato che avvicinano a quanto riportato da Hassan (2017, cit. in Ahmed *et al.*, 2022) su un programma di otto settimane di *training* del *core* in grado di migliorare l'equilibrio dinamico nei giocatori di badminton. La correlazione negativa tra stabilità del *core* e tempo *all'agility T test* viene interpretata dagli autori come indicativa di un effetto positivo del *core* sulla capacità di cambio di direzione, in linea con quanto riportato da Tatsumi e colleghi (2018, cit. in Ahmed *et al.*, 2022) circa l'associazione tra punteggio di agilità e forza degli estensori d'anca in giocatori universitari di badminton; gli autori segnalano tuttavia come tale risultato non sia univoco in letteratura, richiamando gli esiti contrastanti di Nesser e Lee (cit. in Ahmed e colleghi, 2022), che non avevano riscontrato un'associazione significativa tra forza del *core* e agilità in calciatori, e di Ozmen e colleghi (2016, cit. in Ahmed *et al.*, 2022), secondo cui il training del *core* non avrebbe effetto sull'agilità in giocatori adolescenti di badminton. Riguardo alla correlazione non significativa con la potenza degli arti superiori, gli autori la mettono in relazione con i risultati contrastanti già presenti in letteratura, citando sia Shinkle e colleghi (2012, cit. in Ahmed *et al.*, 2022), che avevano riportato una correlazione positiva tra variabili di *performance* e lancio della palla medica, sia Sharrock e colleghi (cit. in Ahmed *et al.*, 2022), che avevano invece riscontrato una correlazione negativa tra lancio della palla medica e stabilità del core in atleti universitari. Gli autori concludono che la stabilità del *core* sia

significativamente correlata con l'equilibrio e con l'agilità nel badminton, mentre la relazione con la potenza degli arti superiori resti debole e non significativa, segnalando come un affidamento eccessivo sul solo *core training* per il miglioramento di tutte le componenti della *performance* rimanga, alla luce di questi risultati, discutibile; sottolineano inoltre che la generalizzabilità dei risultati sia limitata a giocatori di livello distrettuale, auspicando ulteriori studi su atleti di livello *élite* e lo sviluppo di programmi di *core stability* specifici per il badminton.

Capitolo 4 – Discussione e conclusione

4.1 Sintesi dei risultati principali

Come accennato alla fine del capitolo precedente, dei nove studi inclusi nella presente revisione sistematica, la totalità ha impiegato interventi di *biofeedback*, schematizzabili in quattro filoni tematici principali, distinti sia per la natura del parametro fisiologico monitorato sia per la finalità dell'intervento. Un primo gruppo di studi ha utilizzato il *biofeedback* psicofisiologico, basato su parametri quali la variabilità della frequenza cardiaca (HRV) e la risposta galvanica della pelle (GSR), come unico intervento finalizzato a migliorare aspetti tecnici o fisiologici della prestazione: rientrano in questo filone lo studio condotto in Western Canada su 6 tennisti d'*élite* di età compresa tra i 13 e i 14 anni (Galloway, 2011), quello condotto in Corea del Sud su 8 atleti d'*élite* — 3 uomini e 5 donne, tra i 24 e i 37 anni, di cui 5 giocatori di squash e 3 di tennis (Park *et al.*, 2020) — e quello condotto in Iran su giocatori di badminton di alto livello appartenenti alla squadra provinciale e ai campionati di lega, selezionati tramite campionamento intenzionale (Eskandarnejad *et al.*, 2024). Un secondo gruppo ha impiegato il *biofeedback* elettromiografico (EMG) a supporto dell'allenamento neuromuscolare e fisico: Prończuk e colleghi (2025) hanno condotto il loro studio in Polonia su 24 atleti d'*élite* di badminton (età media $18,1 \pm 0,7$ anni) provenienti da programmi di preparazione olimpica, mentre un secondo studio, anch'esso condotto in Polonia su 22 atleti *junior d'élite* di badminton (15-18 anni) suddivisi in un gruppo sperimentale ($n = 11$) e un gruppo di controllo ($n = 11$) tramite randomizzazione stratificata per parametri di *performance*, è quello di Gepfert e colleghi (2025). Un terzo gruppo di studi ha combinato il *biofeedback* con altri interventi psicologici, quali la ristrutturazione cognitiva, tecniche di *mental training* e la *mindfulness*: è il caso dello studio condotto in Corea del Sud su una singola atleta di squash d'*élite* di 18 anni con sintomi di ansia competitiva (Kim *et al.*, 2024), di quello condotto tra Turchia e Germania su 16 tennisti di livello internazionale, 11 maschi e 5 femmine, tra i 16 e i 18 anni (Makaracı *et al.*, 2024), e di quello condotto in Iran su 40 atleti maschi di tennistavolo di livello semi-professionistico, 14-18 anni, suddivisi in quattro gruppi da 10 soggetti ciascuno che comprendeva attività di *mindfulness*, *biofeedback*, combinato e controllo (Behaein *et al.*, 2025). Infine, lo studio condotto in India su 36 giocatori professionisti di badminton di genere maschile (Ahmed *et al.*, 2022) si distingue dagli altri per aver utilizzato il *biofeedback* non come intervento ma come strumento di misurazione della *core stability*, all'interno di un disegno trasversale di tipo correlazionale. Al di là di questa distinzione metodologica, un elemento trasversale accomuna la letteratura analizzata: l'idea del *biofeedback* come strumento di autoregolazione, ossia come mezzo per rendere l'atleta più consapevole dei propri stati interni e in grado di modificarli in modo attivo. I paragrafi successivi hanno l'obiettivo di approfondire questo comun denominatore,

distinguendo tra la componente più propriamente psicofisiologica e quella neuromuscolare, per poi considerare gli studi che integrano il biofeedback con altre tecniche e, in fine, i limiti metodologici che attraversano trasversalmente l'insieme dei nove studi.

4.2 Biofeedback come strumento di autoregolazione psicofisiologica

Gli studi basati sul *biofeedback* legato alla variabilità della frequenza cardiaca condividono un impianto teorico comune, orientato a migliorare la capacità dell'atleta di regolare il proprio livello di attivazione fisiologica attraverso il monitoraggio in tempo reale di indici quali la SDNN, il rapporto LF/HF e la frequenza respiratoria. In tutti e tre gli studi di questo filone, i cambiamenti fisiologici osservati si accompagnano a benefici psicologici concreti: il *training* ha prodotto un aumento significativo della SDNN ($p = 0,017$), della componente LF ($p = 0,012$) e del rapporto LF/HF ($p = 0,012$), oltre a una riduzione significativa della frequenza respiratoria ($p = 0,012$) (Park *et al.*, 2020); nel caso singolo dell'atleta di squash è stata osservata una riduzione dell'ansia di stato sia somatica sia cognitiva, accompagnata da un aumento degli indici HRV nel dominio del tempo (Kim *et al.*, 2024); Eskandarnejad e colleghi (2024) collegano invece il miglioramento dell'autoregolazione, misurato tramite la risposta galvanica della pelle, a un incremento della *performance* nel badminton, misurata tramite il *Badminton French Test*. Un pattern simile, seppur con un protocollo più articolato che integra HRV, attività elettromiografica di superficie, risposta galvanica cutanea e temperatura periferica, si riscontra nello studio di Makaraci e colleghi (2024): il gruppo sperimentale ha mostrato un aumento significativo della *skin temperature* ($p = 0,002$) e una riduzione significativa della *heart rate variability* ($p = 0,016$), accompagnati da una riduzione significativa dell'ansia cognitiva ($p = 0,013$) e somatica ($p < 0,001$) e da un aumento della *self-confidence* ($p = 0,005$), mentre nel gruppo di controllo si è osservato un peggioramento delle stesse variabili psicologiche. Un secondo elemento condiviso da questo filone di studi riguarda il legame tra regolazione psicofisiologica e *performance* sportiva. Nel tennis si osserva un miglioramento della precisione del servizio dopo l'allenamento con *biofeedback*, con il maggiore incremento registrato nel partecipante che presentava, alla baseline, la precisione più bassa del gruppo (+4,62/20 servizi, rispetto al valore iniziale di 5,28/20) (Galloway, 2011); nel tennistavolo, un aumento dell'accuratezza del *forehand flick* è stato registrato nei gruppi sperimentali rispetto al controllo (Behaein *et al.*, 2025); nel badminton, infine, Eskandarnejad e colleghi (2024) riportano un miglioramento della performance sportiva generale nel gruppo sottoposto a *training* di *biofeedback*. Questo pattern, ricorrente in tre discipline differenti, quali tennis, tennistavolo e badminton, rafforza l'idea che l'autoregolazione psicofisiologica non sia fine a sé stessa, ma si possa tradurre concretamente in un beneficio prestativo osservabile e misurabile con strumenti specifici per ciascuno sport.

4.3 Il contributo dell'elettromiografia (EMG) nell'ambito neuromuscolare

Accanto al filone psicofisiologico, gli studi di Prończuk e colleghi (2025) e Gepfert e colleghi (2025) rappresentano un'applicazione del *biofeedback* orientata all'ambito neuromuscolare, entrambi condotti su giovani atleti d'*élite* di badminton polacchi attraverso il *feedback* elettromiografico (EMG) in tempo reale. In questi casi l'attenzione non è rivolta all'ansia o alla regolazione emotiva, come avviene negli studi basati sull'HRV, ma all'efficienza del movimento e alla produzione di forza reattiva (Prończuk *et al.*, 2025; Gepfert *et al.*, 2025). L'EMG è stata applicata a un *training* pliometrico sul ciclo di allungamento-accorciamento (SSC) della durata di 4 settimane, osservando un aumento significativo dell'indice di forza reattiva (RSI) ($p = 0,014$) e dell'impulso verticale ($p = 0,027$), accompagnato da una riduzione significativa delle latenze muscolari nei principali gruppi coinvolti nel gesto di salto (vasto laterale $p = 0,011$, retto femorale $p = 0,008$, gastrocnemio mediale $p = 0,006$) oltre a un'associazione, individuata tramite analisi delle componenti principali ($p = 0,021$), tra il miglioramento della *performance* esplosiva e la riorganizzazione temporale neuromuscolare (Prończuk *et al.*, 2025). Nonostante l'adozione di un obiettivo lievemente diverso, incentrato sulla riduzione delle asimmetrie tra gli arti inferiori piuttosto che sull'efficienza del ciclo SSC in generale, Gepfert e colleghi (2025) hanno osservato risultati coerenti (nessuna differenza alla baseline tra i gruppi, $p > 0,005$), con un aumento significativo dell'altezza di salto ($p = 0,030$ pre-post; $p = 0,001$ tra i gruppi), dell'RSI ($p = 0,012$ pre-post; $p = 0,001$ tra i gruppi) e della potenza di picco nel gruppo sperimentale rispetto al controllo ($p = 0,028$), sebbene le asimmetrie interarto non siano risultate correlate in modo significativo alla *performance* nelle analisi correlazionali dirette. In entrambi i casi, il *biofeedback* EMG non è stato impiegato per modulare stati emotivi o cognitivi, come avviene negli studi basati sull'HRV, ma per rendere visibile e immediatamente disponibile all'atleta un'informazione motoria altrimenti non percepibile, permettendogli di correggere in tempo reale il *pattern* di attivazione muscolare. Questo secondo filone conferma quindi che il concetto di autoregolazione, comune a tutta la letteratura analizzata, si declina in ambito sportivo su almeno due livelli distinti e complementari: quello psicofisiologico-emotivo, tipico degli studi HRV, e quello più strettamente motorio-neuromuscolare, tipico degli studi EMG.

4.4 Integrazione del *biofeedback* con altre tecniche psicologiche

Il terzo filone della letteratura analizzata ha indagato l'effetto del *biofeedback* non come tecnica isolata, ma in combinazione con altri interventi psicologici. Al *biofeedback* HRV è stato affiancato un percorso di ristrutturazione cognitiva condotto secondo l'approccio della terapia cognitivo-comportamentale, con miglioramenti osservati sia negli indici fisiologici sia nelle strategie di

regolazione cognitivo-emotiva dell'atleta, confermati anche dai dati qualitativi raccolti tramite report post-sessione (Kim *et al.*, 2024). Un dato particolarmente interessante emerge dallo studio di Behaein e colleghi (2025), che ha confrontato quattro condizioni sperimentali nel tennistavolo: *mindfulness*, *biofeedback*, la loro combinazione e un gruppo di controllo. Il gruppo che ha ricevuto l'intervento combinato ha ottenuto risultati superiori rispetto ai gruppi che utilizzavano le due tecniche singolarmente, sia per l'accuratezza del gesto tecnico sia per la concentrazione ($p \leq 0,001$ in entrambi i casi), mentre non sono emerse differenze significative tra *mindfulness* e *biofeedback* utilizzati singolarmente ($p = 0,019$ *performance*; $p = 0,020$ concentrazione); per le variabili di recupero della concentrazione e risposta allo stress, invece, i tre gruppi sperimentali non si sono differenziati significativamente tra loro ($p > 0,05$), pur superando tutti il gruppo di controllo. Questo risultato suggerisce che gli interventi integrati, capaci di agire contemporaneamente sulla componente fisiologica e su quella cognitivo-attentiva, potrebbero rappresentare una direzione particolarmente promettente per la ricerca futura in questo ambito, più che l'impiego di una singola tecnica presa isolatamente.

4.5 Limiti della letteratura esaminata

Al di là dei risultati positivi riportati, la letteratura analizzata presenta diversi limiti metodologici, esplicitati dagli stessi autori dei singoli studi, che ne condizionano la solidità e la generalizzabilità. Il primo limite riguarda la dimensione dei campioni, quasi sempre molto ridotta: 6 soggetti, di cui uno con funzione di controllo (Galloway, 2011), 8 soggetti (Park *et al.*, 2020), 16 soggetti (Makaracı *et al.*, 2024), 22 soggetti (Gepfert *et al.*, 2025), mentre lo studio di Kim e colleghi (2024) è addirittura condotto su un singolo soggetto. La ridotta numerosità, unita a una distribuzione non bilanciata tra generi, non ha permesso confronti tra sottogruppi né l'esecuzione di un'analisi di potenza a priori (Makaracı *et al.*, 2024). Il numero ridotto di atleti, combinato con l'uso di più tecniche analitiche di *machine learning*, può aver determinato una sovrastima dei risultati dei modelli predittivi, da considerarsi pertanto preliminari (Prończuk *et al.*, 2025). Un secondo limite riguarda l'assenza di un gruppo di controllo o di una condizione placebo pienamente equivalente in alcuni studi: l'assenza di un gruppo di controllo e l'adozione di un disegno quasi sperimentale sono segnalate esplicitamente da Park e colleghi (2020), mentre l'assenza di una condizione placebo, che rende difficile valutare pienamente la specificità dell'intervento neuromuscolare rispetto all'effetto aspecifico della partecipazione al programma, è rilevata da Gepfert e colleghi (2025). A ciò si aggiunge, per gli studi che combinano il *biofeedback* con altre tecniche, la difficoltà di isolare l'effetto specifico del *biofeedback* da quello delle tecniche associate: l'uso concomitante di respirazione diaframmatica e *imagery* positiva durante le sessioni potrebbe aver influenzato i risultati insieme al *biofeedback*

(Makaracı *et al.*, 2024). Un ulteriore aspetto critico riguarda la durata degli interventi e l'assenza di *follow-up*: la maggior parte degli studi, tra cui quelli di Park e colleghi (2020), Makaracı e colleghi (2024) e Gepfert e colleghi (2025), riporta soltanto i risultati immediati, senza alcun monitoraggio della persistenza degli effetti nel tempo né, in un caso, un monitoraggio degli infortuni nel periodo successivo all'intervento (Gepfert *et al.*, 2025). Un intervento di sole 4 settimane ha inoltre probabilmente evidenziato soltanto adattamenti neuromuscolari iniziali, senza che sia possibile stabilire se tali effetti si mantengano nel tempo (Prończuk *et al.*, 2025). Solo lo studio di Galloway (2011) considera, in parte, la persistenza degli effetti dopo l'interruzione dell'intervento, attraverso la somministrazione di 10 prove successive al termine del programma. Un ulteriore limite, segnalato in più studi, riguarda la strumentazione e le procedure di misurazione: l'altezza fissa del box utilizzato per i *depth jump* e le difficoltà intrinseche dell'elettromiografia di superficie quali interferenze, spostamenti degli elettrodi, possono aver introdotto variabilità nei dati (Prończuk *et al.*, 2025); un'elevata variabilità in alcune variabili, come la *stiffness* e gli indici di asimmetria, ha reso necessarie correzioni statistiche ad hoc, mentre la suddivisione dei partecipanti in *responder* e *non-responder* tramite mediana può aver semplificato la reale variabilità delle risposte individuali (Gepfert *et al.*, 2025). Behaein e colleghi (2025), segnalano che l'aver analizzato un solo gesto tecnico, il *forehand flick*, orientato soprattutto alla precisione e alla concentrazione, potrebbe aver favorito il miglioramento di queste due dimensioni psicologiche a scapito di una rilevazione più sensibile degli effetti sulla gestione dello stress, per cui non sono emerse differenze significative tra i gruppi sperimentali. Infine, va segnalato il tema del trasferimento dei risultati dal contesto laboratoriale a quello reale: la struttura molto lunga del programma, e in particolare la prima fase svolta in un contesto più "clinico" e sperimentale, risultava scomoda per alcuni ragazzi, che faticavano a trasferire i benefici appresi al contesto di gioco reale (Galloway, 2011); gli allenatori coinvolti, pur riconoscendo il valore della progressione in cinque fasi, ne hanno evidenziato come principale limite i tempi ritenuti eccessivi per una sua completa applicazione. Un'ulteriore criticità riguarda l'eterogeneità dei disegni di ricerca e dei protocolli di intervento adottati nei diversi studi, che rende difficile stabilire quale approccio risulti effettivamente più efficace. In questo senso, il disegno trasversale correlazionale adottato da Ahmed e colleghi (2022), basato esclusivamente su giocatori di badminton appartenenti a una specifica categoria, limita la piena generalizzabilità dei risultati. Inoltre, l'assenza di una relazione significativa tra *core stability* e potenza degli arti superiori non consente di affermare con certezza che la stabilità del core influenzi questa specifica componente della *performance* (Ahmed *et al.*, 2022). Nel complesso, nonostante ogni approccio abbia mostrato risultati favorevoli all'interno del singolo studio, la mancanza di repliche condotte in condizioni comparabili non permette di stabilire quale intervento sia maggiormente efficace.

4.6 Implicazioni pratiche e direzioni future di ricerca

Nonostante i limiti evidenziati, la letteratura analizzata offre alcuni spunti rilevanti per la pratica e per la ricerca futura, alcuni dei quali esplicitati direttamente dagli autori dei singoli studi. Gli studi futuri dovrebbero includere campioni più ampi e variegati, estendendo l'indagine ad altre tipologie di sport, oltre a indagare, accanto all'HRV, ulteriori variabili quali le sensazioni soggettive sullo stato psicologico degli atleti: ansia di stato competitivo, flow, stato emotivo (Park *et al.*, 2020). Allo stesso modo, oltre a campioni più ampi, avere protocolli più chiari e la verifica diretta se i miglioramenti osservati in laboratorio si possano tradurre in un reale miglioramento della *performance* in gara sono previsti da Makaracı e colleghi (2024), non essendo stato possibile, nel loro studio, misurare direttamente la *performance* specifica nel tennis a causa degli impegni agonistici degli atleti coinvolti. I risultati ottenuti, per quanto positivi, devono essere considerati preliminari e necessitano di conferma in studi futuri condotti su campioni più ampi e con interventi di durata maggiore rispetto alle 4 settimane previste dal protocollo (Prończuk *et al.*, 2025). La necessità di condurre ulteriori ricerche su atleti di livello *élite* e di sviluppare programmi di allenamento più specifici è sottolineata da Ahmed e colleghi (2022), i quali osservano come un approccio esclusivamente centrato sul *core training* per il miglioramento di tutte le componenti della prestazione rimanga discutibile alla luce dei loro risultati. Anche la necessità di ulteriori studi per confermare e approfondire i risultati ottenuti nel campione di giocatori di badminton, pur senza indicazioni operative dettagliate, viene sottolineata da Eskandarnejad e colleghi (2024). Il numero ancora ridotto di studi disponibili su questo tema suggeriscono inoltre che vi sia ampio margine per approfondire l'utilizzo del *biofeedback* negli sport di racchetta, replicando i protocolli già esistenti su campioni più numerosi. Un primo elemento a favore di questo ambito riguarda il fatto che il *biofeedback* non sembra utile soltanto per il miglioramento diretto della performance, ma anche per lo sviluppo di competenze trasversali quali la consapevolezza corporea e la gestione dello stress (Kim *et al.*, 2024; Makaracı *et al.*, 2024; Behaein *et al.*, 2025). Un secondo elemento, suggerito dai risultati di Behaein e colleghi (2025), riguarda la possibile integrazione del *biofeedback* con altre tecniche psicologiche, la quale può risultare più efficace rispetto al suo utilizzo isolato. Infine, dal momento che le misure indagate nei nove studi si distribuiscono su tre livelli: fisiologico, psicologico e di *performance*, senza che quasi nessuno studio li colleghi esplicitamente tra loro in un unico disegno, un possibile sviluppo futuro potrebbe consistere nel progettare ricerche in grado di integrare questi tre livelli, così da chiarire meglio i meccanismi attraverso cui il *biofeedback* agisce sulla prestazione sportiva. Un'ulteriore direzione di ricerca riguarda specificamente il *neurofeedback*. Nonostante questa tecnica fosse esplicitamente presente tra i criteri di inclusione della presente revisione e il termine "*neurofeedback*" comparisse in tutte e tre le stringhe di ricerca utilizzate, nessuno dei nove studi risultati eleggibili ha impiegato un

intervento di questo tipo. Tale assenza risulta ancora più significativa se confrontata con quanto emerso dalle revisioni sistematiche esaminate nello stato dell'arte, le quali hanno invece individuato un numero consistente di studi di *neurofeedback* applicati ad altre discipline sportive, quali tiro con l'arco, danza, tiro a segno, golf *putting*, equilibrio dinamico nel judo, pallacanestro e ciclismo, con effetti nel complesso positivi sulla *performance* motoria (Yu *et al.*, 2025; Cheng *et al.*, 2024; Rydzik *et al.*, 2023). Ciò suggerisce che il *neurofeedback*, pur essendo una tecnica già validata in altri contesti sportivi, non risulta ancora applicato, o quantomeno non pubblicato, in relazione agli sport di racchetta: un'area che rappresenta pertanto un ulteriore e più specifico ambito di sviluppo per la ricerca futura, distinto da quello relativo al solo biofeedback.

4.7 Conclusioni

Alla luce di quanto emerso dall'analisi critica della letteratura, il presente studio intende approfondire in particolare l'utilizzo del *biofeedback* come strumento di autoregolazione psicofisiologica nello sport, prendendo come riferimento principale gli studi condotti da Galloway (2011), Makaracı e colleghi (2024), Behaein e colleghi (2025) ed Eskandarnejad e colleghi (2024), che meglio rappresentano il legame tra regolazione fisiologica, benessere psicologico e prestazione negli sport di racchetta. Si tratta di un ambito di ricerca ancora limitato dal punto di vista numerico e caratterizzato, come illustrato nel paragrafo 4.5, da campioni ridotti, disegni sperimentali eterogenei e mancanza di dati generalizzabili e di *follow-up*; ciò nonostante, presenta margini di sviluppo, sia sul piano scientifico sia su quello applicativo, per l'allenamento mentale degli atleti che praticano queste discipline. La presente revisione sistematica si colloca in continuità con il vuoto identificato nello stato dell'arte (paragrafo 2.6), dove le revisioni sistematiche e le metanalisi precedenti (paragrafo 2.6) avevano trattato la popolazione atletica come categoria sostanzialmente omogenea, senza mai isolare gli sport di racchetta come oggetto sistematico di indagine (Yu *et al.*, 2025; Cheng *et al.*, 2024; Rydzik *et al.*, 2023; Pagaduan *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2025). In questo senso, il presente lavoro rappresenta un primo tentativo di colmare questa lacuna, offrendo una sintesi mirata delle evidenze disponibili su tennis, tennistavolo, badminton, squash e padel. Il quadro che ne emerge resta comunque incompleto: i nove studi individuati hanno riguardato esclusivamente interventi di *biofeedback*, mentre il *neurofeedback*, pur già applicato con risultati positivi in altre discipline sportive secondo le revisioni considerate nello stato dell'arte, non risulta a oggi descritto e rappresentato totalmente all'interno degli sport di racchetta. Questa seconda mancanza scientifica, più specifica rispetto alla precedente, rappresenta quindi un'ulteriore indicazione per la ricerca futura in questo specifico ambito.

Bibliografia

- Ahmed, S., Saraswat, A., & Esht, V. (2022). Correlation of core stability with balance, agility and upper limb power in badminton players: A cross-sectional study. *Sport Sciences for Health*, 18, 165–169. <https://doi.org/10.1007/s11332-021-00789-w>
- Amihai, I., & Kozhevnikov, M. (2014). Arousal vs. relaxation: A comparison of the neurophysiological and cognitive correlates of Vajrayana and Theravada meditative practices. *PLOS ONE*, 9(7), Article e102990. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102990>
- Behaein, N., Farsi, A., Franz, E., & Lipowski, M. (2025). Effects of biofeedback and mindfulness on the psychological skills and forehand flick accuracy in adolescent table tennis players. *Journal of Rational-Emotive & Cognitive-Behavior Therapy*, 43, 17. <https://doi.org/10.1007/s10942-025-00581-6>
- Blumenstein, B., & Orbach, I. (2014). Biofeedback for sport and performance enhancement. In *Oxford handbook topics in psychology*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199935291.013.001>
- Cádiz Gallardo, M. P., Pradas de la Fuente, F., Moreno-Azze, A., & Carrasco Páez, L. (2023). Physiological demands of racket sports: A systematic review. *Frontiers in Psychology*, 14, 1149295. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1149295>
- Cece, V., Guillet-Descas, E., & Martinet, G. (2020). Mental training program in racket sports: A systematic review. *International Journal of Racket Sports Science*, 2(1), 1–15. <https://doi.org/10.30827/Digibug.63721>
- 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, Artículo 1331997. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1331997>
- Costa, Y. P. da, Freitas-Júnior, C., Soares-Silva, E. L., de Lima-Júnior, D., Batista, G. R., Hayes, L., & de Sousa Fortes, L. (2022). Mental fatigue and ball sports: A narrative review focused on physical, technical, and tactical performance. *Motriz: Revista de Educação Física*, 28, e10220004822. <https://doi.org/10.1590/S1980-657420220004822>

- Dares, H., & Eriksson, P. (2022). *Mental toughness as a decisive factor in critical moments of elite male tennis* [Bachelor's thesis, The Swedish School of Sport and Health Sciences].
- Edel, A., Song, Y., Wiewelhove, T., & Ferrauti, A. (2019). Activity profiles and physiological responses during match play in four popular racquet sports: A literature review. *German Journal of Exercise and Sport Research*, 49(3), 221–231. <https://doi.org/10.1007/s12662-019-00610-4>
- Eskandarnejad, M., Zamanlu, M., & Fekrvand Leilabadi, N. (2024). Effectiveness of heart rate variability biofeedback trainings on sports performance and galvanic skin response in badminton players. *Sport Psychology Studies*, 13(50), 94–106. <https://doi.org/10.22089/SPSYJ.2024.16567.2467>
- Fritsch, J., Feil, K., Jekauc, D., Latinjak, A. T., & Hatzigeorgiadis, A. (2022). The relationship between self-talk and affective processes in sports: A scoping review. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 17(1), 482–515. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2021.2021543>
- Fuchs, M., Liu, R., Malagoli Lanzoni, I., Munivrana, G., Straub, G., Tamaki, S., Yoshida, K., Zhang, H., & Lames, M. (2018). Table tennis match analysis: A review. *Journal of Sports Sciences*, 36(23), 2653–2662. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1450073>
- Galloway, S. M. (2011). The effect of biofeedback on tennis service accuracy. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 9(3), 251–266. <https://doi.org/10.1080/1612197X.2011.614851>
- García-Giménez, A., Pradas de la Fuente, F., Castellar Otín, C., & Carrasco Páez, L. (2022). Performance outcome measures in padel: A scoping review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), 4395. <https://doi.org/10.3390/ijerph19074395>
- Gepfert, M., Gołaś, A., Maszczyk, A., Ornowski, K., & Pietraszewski, P. (2025). Functional asymmetries and force efficiency in elite junior badminton: A controlled trial using hop test metrics and neuromuscular adaption indices. *Applied Sciences*, 15, 8450. <https://doi.org/10.3390/app15158450>
- Gould, D., & Voelker, D. K. (2014). History of sport psychology. In R. C. Eklund & G. Tenenbaum (Eds.), *Encyclopedia of sport and exercise psychology* (pp. 346–351). SAGE Publications. <https://doi.org/10.4135/9781483332222.n137>

- Groppel, J., & DiNubile, N. (2009). Tennis: For the health of it! *The Physician and Sportsmedicine*, 37(2), 40–50. <https://doi.org/10.3810/psm.2009.06.1700>
- Hatzigeorgiadis, A., Zourbanos, N., Galanis, E., & Theodorakis, Y. (2011). Self-talk and sports performance: A meta-analysis. *Perspectives on Psychological Science*, 6(4), 348–356. <https://doi.org/10.1177/1745691611413136>
- Heilmann, F., Weinberg, H., & Wollny, R. (2022). The impact of practicing open- vs. closed-skill sports on executive functions—A meta-analytic and systematic review with a focus on characteristics of sports. *Brain Sciences*, 12(8), 1071. <https://doi.org/10.3390/brainsci12081071>
- Jeong, Y. H., Healy, L. C., & McEwan, D. (2023). The application of Goal Setting Theory to goal setting interventions in sport: A systematic review. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 16(1), 474–499. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2021.1901298>
- Kim, B., Hwang, S., & Kang, H. (2024). Heart rate variability biofeedback and cognitive restructuring for self-regulation: A case study. *International Journal of Disabilities Sports and Health Sciences*, 7(1), 103–113. <https://doi.org/10.33438/ijdsbs.1360544>
- Kondrič, M., Zagatto, A. M., & Sekulić, D. (2013). *The physiological demands of table tennis: A review*. *Journal of Sports Science and Medicine*, 12(3), 362–370. <https://www.jssm.org>
- Kudlackova, K., Eccles, D. W., & Dieffenbach, K. (2013). Use of relaxation skills in differentially skilled athletes. *Psychology of Sport and Exercise*, 14(4), 468–475. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2013.02.004>
- Lees, A. (2003). Science and the major racket sports: A review. *Journal of Sports Sciences*, 21(9), 707–732. <https://doi.org/10.1080/0264041031000140275>
- Lehrer, P. M., & 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>
- 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, Article 617541. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.617541>

- Liparoti, M., & Lopez, E. T. (2021). Biofeedback in sport and education. *Journal of Human Sport and Exercise*, 16(3proc), S922–S929. <https://doi.org/10.14198/jhse.2021.16.Proc3.09>
- Liu, R., Kondrič, M., & Wang, J. (2025). A comprehensive bibliometric analysis of the sport of squash (1973–2024): Progress, collaboration, findings, and thematic evolution. *Sports*, 13(6), 157. <https://doi.org/10.3390/sports13060157>
- Lochbaum, M., Stoner, E., Hefner, T., Cooper, S., Lane, A. M., & Terry, P. C. (2022). Sport psychology and performance meta-analyses: A systematic review of the literature. *PLOS ONE*, 17(2), Article e0263408. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263408>
- 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>
- 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>
- Morgan, S. J., & Mora, J. A. M. (2017). Effect of heart rate variability biofeedback on sport performance, a systematic review. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 42, 235–245. <https://doi.org/10.1007/s10484-017-9364-2>
- Nien, J.-T., Gill, D. L., Hung, T.-M., Chou, T.-Y., Chang, Y.-K., & Liu, C.-S. (2023). Effect of brief mindfulness and relaxation inductions on anxiety, affect and brain activation in athletes. *Psychology of Sport and Exercise*, 67, Article 102422. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2023.102422>
- 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>
- Pancar, S. (2020). The effect of open and closed-skill sports on cognitive functions. *Sportif Bakış: Spor ve Eğitim Bilimleri Dergisi*, 7(2), 159–166. <https://doi.org/10.33468/sbsebd.143>

- Park, S.-H., Hwang, S., & Lee, S.-M. (2020). Pilot application of biofeedback training program for racket sports players. *Annals of Applied Sport Science*, 8(4), e898. <https://doi.org/10.29252/aassjournal.898>
- Paul, M., Garg, K., & Sandhu, J. S. (2012). Role of biofeedback in optimizing psychomotor performance in sports. *Asian Journal of Sports Medicine*, 3(1), 29–40. <https://doi.org/10.5812/asjsm.34722>
- Pluim, B. M., Staal, J. B., Marks, B. L., Miller, S., & Miley, D. (2007). Health benefits of tennis. *British Journal of Sports Medicine*, 41(11), 760–768. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2006.034967>
- Prończuk, M., Skalski, D., Łosińska, K., Maszczyk, A., & Gołaś, A. (2025). Neuromechanical adaptations to EMG-guided SSC training in elite badminton players: A predictive multivariate approach. *Frontiers in Sports and Active Living*, 7, 1634656. <https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1634656>
- Reinebo, G., Alfonsson, S., Jansson-Fröjmark, M., & Lundgren, T. (2024). Effects of psychological interventions to enhance athletic performance: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 54, 347–373. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01931-z>
- Rupprecht, A. G. O., Tran, U. S., & Gröpel, P. (2024). The effectiveness of pre-performance routines in sports: A meta-analysis. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 17(1), 39–64. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2021.1944271>
- 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), Articolo 660. <https://doi.org/10.3390/brainsci13040660>
- Simonsmeier, B. A., Andronie, M., Buecker, S., & Frank, C. (2020). The effects of imagery interventions in sports: A meta-analysis. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 14(1), 186–207. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2020.1780627>
- Starzak, M., Niżnikowski, T., Biegajło, M., Nogal, M., Arnista, W. Ł., Mastalerz, A., et al. (2024). Attentional focus strategies in racket sports: A systematic review. *PLOS ONE*, 19(1), e0285239. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285239>

- Sturma, A., Hruby, L. A., Prahm, C., Mayer, J. A., & Aszmann, O. C. (2018). Rehabilitation of upper extremity nerve injuries using surface EMG biofeedback: Protocols for clinical application. *Frontiers in Neuroscience*, 12, 906. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00906>
- 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. (2024). *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>
- Wang, C.-H., Fu, H.-L., Kao, S.-C., Moreau, D., & Yang, C.-T. (2023). Systems factorial technology provides novel insights into the cognitive processing characteristics of open-skill athletes. *Psychology of Sport and Exercise*, 66, 102395. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2023.102395>;
- Wang, Q., Zhong, J., Wang, Y., Bao, H., & Guo, S. (2026). Mindfulness practice and sport-specific performance: Evidence from a systematic review and three-level meta-analysis. *International Journal of Sports Science & Coaching*. <https://doi.org/10.1177/17479541261428257>
- Wang, W., Schweickle, M. J., Arnold, E. R., & Vella, S. A. (2025). Psychological interventions to improve elite athlete mental wellbeing: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 55, 877–897. <https://doi.org/10.1007/s40279-024-02173-3>
- Wang, Y., Lei, S.-M., & Fan, J. (2023). Effects of mindfulness-based interventions on promoting athletic performance and related factors among athletes: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trial. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), Article 2038. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032038>
- Williamson, O., Swann, C., Bennett, K. J. M., Bird, M. D., Goddard, S. G., Schweickle, M. J., & Jackman, P. C. (2024). The performance and psychological effects of goal setting in sport: A systematic review and meta-analysis. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 17(2), 1050–1078. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2022.2116723>
- 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>
- Yu, C.-L., Cheng, M.-Y., An, X., Chueh, T.-Y., Wu, J.-H., Wang, K.-P., & Hung, T.-M. (2025). The effect of EEG neurofeedback training on sport performance: A systematic review and meta-analysis.

Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 35(1), Articolo e70055.
<https://doi.org/10.1111/sms.70055>

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>