



**e-CAMPUS**  
UNIVERSITÀ

**DOTTORATO DI RICERCA IN**  
SCIENZE APPLICATE A BENESSERE E SOSTENIBILITÀ

**CICLO XXXVII**

COORDINATORE Prof. Baldari Carlo

Relazione tra sviluppo puberale e carichi di allenamento in giovani atleti per il  
benessere e la prevenzione degli infortuni

Settore Scientifico Disciplinare M – EDF\02

**Dottorando**  
Dott. Lorenzo Corsi

*Lorenzo Corsi*

**Tutor**  
Prof. Carlo Baldari

*Carlo Baldari*

**Co-Tutor**  
Prof. Fabrizio Perroni

*Fabrizio Perroni*

## INDICE

ABSTRACT	pag.4
1. Introduzione	pag.5
1.1 La maturità puberale	pag.7
1.2 Metodi di valutazione della maturità puberale	pag.9
1.2.1 PHV – Peak Height Velocity	pag.9
1.2.2 Equazioni predittive	pag.15
1.2.3 L'età scheletrica	pag.17
1.2.4 Biomarcatori	pag.19
1.2.5 PDS – Pubertal Development Scale	pag.21
1.3 L'importanza della valutazione della maturità nei giovani atleti per il benessere e la prevenzione degli infortuni	pag.23
2. Studio 1 – Assessment of Performance in Youth Soccer Players: Should We Consider the Maturation Status?	pag.27
2.1. Introduction	pag.27
2.2. Materials and methods	pag.29
2.3. Results	pag.33
2.4. Discussion	pag.37
2.5. Conclusions	pag.40
3. Studio 2 – Chronological age, relative age, pubertal development, and their impact on countermovement jump performance in adolescent football players: An integrative analysis	pag.41
3.1. Introduction	pag.41
3.2. Materials and methods	pag.43
3.3. Results	pag.46
3.4. Discussion	pag.51

4. Maturità puberale ed influenze sulla performance	pag.56
4.1 Effetti della maturità puberale sul metabolismo energetico	pag.59
4.2 Effetti della maturità puberale sul metabolismo aerobico	pag.61
4.3 Effetti della maturità puberale sul metabolismo anaerobico	pag.64
4.4 Effetti della maturità puberale sugli enzimi	pag.71
4.5 Effetti della maturità puberale sugli adattamenti neuromuscolari	pag.72
4.6 Effetti della maturità puberale sul modello prestativo del calcio giovanile ed il “Relative Age Effect” (RAE)	pag.86
4.7 Effetti della maturità puberale sulla fatica e la capacità di recupero	pag.108
5. Protocolli e consensi sull’allenamento in età evolutiva	pag.113
5.1. IOC Consensus Statement on training the elite child	pag.115
5.2. IOC Consensus Statement on youth athletic development	pag.116
5.3. Long-term athlete development di Istvan Balyi	pag.119
5.4. The Youth Physical Development Model di Lloyd e Oliver	pag.125
6. Protocolli ed indicazioni per l’allenamento della forza in età giovanile	pag.129
7. Identificazione del talento e maturità puberale: modelli tradizionali ed il modello longitudinale multidimensionale	pag.140
8. Figure di sintesi: considerazioni fisiologiche e metodologiche per le diverse categorie puberali	pag.148
9. Conclusioni e prospettive	pag.151
10. Bibliografia	pag.155

## ABSTRACT

This doctoral research aimed to investigate the relationship between chronological age, relative age, pubertal development, and their impact on performance in youth football players. The research involved two distinct studies: the first included 61 young players from the U14 category, while the second examined 259 elite players in the U14-U19 categories.

In the first study, 61 young football players (mean age:  $13.5 \pm 0.6$  years; body height:  $169.0 \pm 8$  cm; body mass:  $59.0 \pm 10$  kg) were evaluated for their physical capabilities using field tests, including the Countermovement Jump (CMJ), the Yo-Yo Intermittent Recovery Test Level 1, the Repeated Sprint Ability (RSA) test, and the 10-m linear sprint. Pubertal status was assessed using the Pubertal Development Scale (PDS). The results showed weak correlations ( $p > 0.05$ ) between chronological age, relative age, and pubertal status measures with physical performance. However, significant correlations were found between different measures of pubertal status and the variable "work" in the CMJ test ( $r = 0.33-0.36$ ;  $p < 0.01$ ), as well as between chronological age and CMJ height ( $r = -0.297$ ;  $p = 0.02$ ).

The second study examined a larger sample of 259 young football players ( $14.9 \pm 1.8$  yrs;  $169.7 \pm 9.8$  cm;  $60.6 \pm 11.3$  kg;  $20.9 \pm 2.6$  kg·m<sup>-2</sup>) belonging to elite football academies, to analyze the relationship between CMJ performance, football category (U14, U15, U17, U19), chronological age, relative age, and pubertal development. A non-uniform distribution of birth dates across the quarters of the year ( $\chi^2 = 41.74$ ;  $p < 0.001$ ) highlighted a significant relative age effect (RAE). Chronological age was significantly associated with CMJ performance ( $F(6,231) = 8.85$ ;  $p < 0.001$ ,  $\eta^2_p = 0.187$ ), and a significant interaction effect was observed between age and birth quarter.

Both studies revealed considerable variability in pubertal development among players of the same chronological age, demonstrating that this variability significantly impacts physical performance, particularly in the CMJ test. Biologically more mature players performed better in the CMJ, and this relationship became more pronounced as players progressed through the pubertal stages.

In younger categories, particularly U14, the relative age effect (RAE) was strongly evident, with a significant overrepresentation of players born in the first quarter of the year. However, this effect tended to decrease in older categories (U17, U19), suggesting that selection processes based solely on chronological age can introduce biases, disadvantaging players born later or those who mature more slowly.

These findings highlight the importance of personalizing training programs based on biological maturity rather than chronological age. Moreover, strategies such as bio-banding, which groups players based on biological age rather than birth year, are recommended to mitigate the relative age effect and ensure a fairer talent selection process.

The implications of these findings go beyond physical performance, suggesting that coaches and strength and conditioning professionals must be aware of the crucial role that maturation plays in athletic development. Individualized training programs, tailored to biological maturity, could ensure a more balanced and sustainable development pathway for young football players, while promoting the overall health and well-being of the young athlete.

## 1. Introduzione

L'allenamento e lo sviluppo degli atleti giovani rappresentano una sfida complessa che richiede l'adozione di strategie basate su solide evidenze scientifiche. Nel contesto del calcio giovanile, la maturazione fisica degli atleti gioca un ruolo cruciale nella determinazione delle performance fisiche e nella selezione del talento (Vaeyens et al., 2006; Vaeyens et al., 2008; Williams et al., 2023; Williams, 2023). Gli atleti in età evolutiva presentano significative differenze individuali nel loro sviluppo biologico (Faigenbaum et al., 2009; Armstrong et al., 2015; Francini et al., 2019), che possono influenzare non solo la loro capacità di competere, ma anche il modo in cui vengono valutati da allenatori e osservatori. Questo divario nello sviluppo è spesso amplificato dall'effetto dell'età relativa (RAE), che favorisce i giocatori nati nei primi mesi dell'anno, e dalla variabilità nella maturazione puberale, con differenze evidenti nei tempi e nei ritmi di crescita (Pérez-González et al., 2021; Bozděch et al., 2023).

C'è la speculazione che l'influenza dell'età relativa e della maturazione biologica potrebbe influenzare negativamente gli approcci tradizionali e moderni all'identificazione e allo sviluppo del talento (Smith et al., 2018). L'età relativa si riferisce alla variazione dell'età cronologica all'interno di un gruppo di età specifico, che viene determinata confrontando le date di nascita degli individui e le date di taglio per quel particolare gruppo di età (Hill et al., 2020). Poiché gli atleti giovanili sono tradizionalmente raggruppati per età cronologica (ad esempio, U10, U11, U12, ecc.) per fornire una competizione equa e pari opportunità, potrebbe esserci un notevole divario di età fino a 12 mesi tra i partecipanti nella stessa coorte. Tale scenario è ancora più problematico quando la maturazione biologica viene trascurata (Hill et al., 2020). Il progresso verso lo stato di maturità o età adulta, che è caratterizzato da stato, tempistica e ritmo, può

essere definito come maturazione biologica (Malina et al., 2019). Tassi elevati di variabilità interindividuale caratterizzano la maturazione biologica e indicano che i bambini della stessa età cronologica non maturano simultaneamente, con alcuni individui che maturano in anticipo o in ritardo rispetto ai loro coetanei (Jackowski et al., 2011). Tale considerevole variabilità nella crescita somatica e biologica è stata spesso descritta nella letteratura (Hill et al., 2020), con possibili conseguenze per le variabili associate alle performance calcistiche (Kelly et al., 2021). Le evidenze suggeriscono che ci siano significativi vantaggi in altezza, massa magra corporea e componenti associate alle performance in individui con stato di maturità avanzato (Figueiredo et al., 2009; Selmi et al., 2020; Vaeyens et al., 2006). Pertanto, possono verificarsi pregiudizi nella selezione dei giocatori a causa dell'età relativa e della maturazione biologica e causare impatti profondi sui programmi di identificazione e sviluppo del talento.

L'età relativa e la maturazione biologica dovrebbero essere riconosciute come costrutti separati che esistono e funzionano indipendentemente. Tale considerazione potrebbe evitare potenziali pregiudizi nella selezione e ottimizzare i processi per identificare e sviluppare giovani talenti nelle accademie di calcio professionistiche (Hill et al., 2020). Di recente, sono stati sviluppati e testati approcci promettenti per raggruppare giovani calciatori in base alla loro maturazione biologica invece che alla loro età cronologica (Cumming et al., 2017). Questi nuovi formati competitivi offrono vantaggi per i programmi di identificazione e sviluppo del talento (Malina et al., 2019).

Tuttavia, l'implementazione di tali approcci innovativi nel calcio è impegnativa poiché richiede metodi appropriati che soddisfino criteri etici ed economicamente pragmatici per valutare lo stato di maturità biologica (Leyhr et al., 2020). Lo stato di maturità biologica negli atleti giovanili è comunemente determinato utilizzando vari metodi, categorizzati in indicatori di maturità scheletrica, sessuale o somatica (Baxter-Jones et al., 2005). Nonostante l'accuratezza dei metodi utilizzati per valutare la maturazione biologica, la loro efficacia è limitata da fattori come l'accessibilità alle attrezzature, i requisiti di competenza nell'analisi, l'invasività dei metodi di valutazione, così come le preoccupazioni legali ed etiche associate a restrizioni temporali e finanziarie (Lloyd et al., 2014). Per superare tali ostacoli, almeno in parte, Petersen et al. (1988) hanno sviluppato una scala che misura continuamente lo stato puberale e correla significativamente con altri metodi di maturazione biologica. Questa scala, nota come Scala dello Sviluppo Puberale (PDS), include domande sulle gonadi, sulle surrenali e sui fattori di crescita che cambiano il corpo durante il periodo puberale (Petersen et al., 1988). Il PDS è stato

recentemente introdotto come uno strumento prezioso per stimare lo sviluppo puberale negli studi sul calcio (Perroni et al., 2018, 2019, 2023).

Questo dottorato si pone l'obiettivo di approfondire come la maturazione puberale e l'effetto dell'età relativa (RAE) possano incidere sui processi di selezione e sulle metodologie di allenamento più appropriate nei settori giovanili del calcio, esaminando in particolare la relazione tra età cronologica, maturazione biologica e performance atletiche nei giovani calciatori.

## 1.1 La maturità puberale

La maturazione biologica è un processo continuo che ha inizio nell'età prenatale e prosegue per circa i primi vent'anni della vita postnatale. La maturazione biologica coinvolge tutti i tessuti, organi e sistemi del corpo e può essere valutata in due modi distinti: attraverso lo stato, che rappresenta il livello di maturazione raggiunto a una determinata età cronologica, e attraverso il tempo, che si riferisce all'età cronologica in cui si verificano eventi maturativi specifici (Malina et al., 2015). Sebbene correlati, stato e tempo non sono concetti intercambiabili. Un terzo aspetto legato alla maturazione, ma più complesso da stimare, è il ritmo di maturazione, che rappresenta la velocità con cui un individuo avanza verso la maturità completa (Malina et al., 2015).

È fondamentale che tutti gli studi prospettici sui bambini, sia nell'ambito della classificazione degli sport giovanili che nelle indagini di ricerca, includano una valutazione accurata della maturità. Tale valutazione ha un'importanza specifica nella classificazione dei giovani atleti durante l'adolescenza, poiché la variabilità individuale nella crescita somatica e biologica tra bambini della stessa età cronologica diventa particolarmente evidente durante il picco di crescita adolescenziale. In questo contesto, l'età cronologica offre informazioni limitate per valutare la crescita e la maturazione (Mirwald et al., 2002). È quindi indispensabile considerare il ritmo e il timing del progresso verso lo stato maturo per comprendere appieno il processo di crescita nei bambini e adolescenti (Mirwald et al., 2002).

La distinzione tra età cronologica e maturità biologica rappresenta un tema cruciale nello sviluppo degli atleti, soprattutto in discipline come il calcio, dove le variazioni individuali nel ritmo di crescita e maturazione possono influenzare significativamente la performance e il potenziale futuro degli atleti. L'età cronologica, definita come il tempo trascorso dalla nascita, non riflette necessariamente lo stato di sviluppo fisico e ormonale di un individuo (Malina, et

al., 2004). La maturità biologica, invece, si riferisce al grado di sviluppo raggiunto rispetto agli stadi della crescita puberale e scheletrica, e può essere valutata attraverso parametri quali, ad esempio, lo sviluppo dei caratteri sessuali secondari, la velocità di crescita e i livelli ormonali (Mirwald et al., 2002).

Lo stato puberale viene indicato dallo sviluppo delle caratteristiche sessuali secondarie che includono, per entrambi i sessi, la comparsa dei peli pubici ed ascellari (Malina et al., 2015). Nelle ragazze si osservano lo sviluppo del seno e l'inizio del menarca (prima mestruazione), mentre nei ragazzi si evidenziano la maturazione dei genitali (G), il cambiamento della voce e la comparsa di peli facciali (Malina et al., 2015). Questi segni riflettono la maturazione degli assi ipotalamo-ipofisi-gonadico e ipotalamo-ipofisi-surrenalico, che governano lo sviluppo attraverso il sistema neuroendocrino (Malina et al., 2015). In particolare, lo sviluppo iniziale del seno e dei genitali è regolato dagli ormoni gonadici, mentre la comparsa dei peli pubici è sotto l'influenza degli ormoni surrenalici (Malina et al., 2015).

Lo stato di maturità, i cui principali indicatori utilizzati sono l'età scheletrica, lo stadio della pubertà e il volume testicolare, riflette lo stadio di sviluppo puberale al momento dell'osservazione (Malina et al., 2020). Anche l'età al PHV (Bergeron et al., 2015) e l'età del menarca possono essere usate come indicatori dello stato di maturità biologica (Malina et al., 2020). L'offset di maturità, che stima il tempo rimanente prima di raggiungere il PHV, e l'età prevista al PHV, sono comunemente utilizzati per stimare la tempistica della maturità (Bergeron et al., 2015)

Tuttavia, sebbene siano disponibili diverse metodologie per valutare questi aspetti della maturazione, ognuna di esse presenta delle limitazioni significative. Ad esempio, l'età scheletrica richiede attrezzature specializzate, è costosa e comporta preoccupazioni legate alla sicurezza delle radiazioni. Altri metodi, come la valutazione dell'età dentale e morfologica, sono tecniche di applicazione più ampia ma con una validità limitata. La valutazione delle caratteristiche sessuali secondarie, sebbene utile nel periodo adolescenziale, può risultare intrusiva per i bambini e i loro genitori in contesti non clinici, e inoltre non riflette con precisione il timing della crescita. Questo metodo fornisce solo un'indicazione dello stadio della pubertà al momento dell'osservazione, senza informazioni sull'età di inizio o sulla durata degli stadi puberali. (Mirwald et al., 2002)

Metodi somatici come l'età del picco di velocità di crescita (PHV) richiedono misurazioni seriali raccolte nel tempo per determinare il momento esatto del PHV, rendendoli poco adatti a una singola misurazione (Mirwald et al., 2002). Nonostante ciò, l'età del PHV è uno degli indicatori

più comunemente utilizzati negli studi longitudinali sull'adolescenza per stimare la maturità. Le caratteristiche sessuali secondarie, come lo sviluppo del seno, dei genitali e dei peli pubici, sono limitate al periodo puberale e forniscono solo informazioni puntuali, senza indicare il momento di inizio o la durata del processo (Mirwald et al., 2002). Diversi studi (Carskadon & Acebo, 1993; Mirwald et al., 2002; Philippaerts et al., 2006; Bergeron et al., 2015; Malina et al., 2020) hanno cercato di sviluppare metodi semplici e non invasivi per la valutazione della maturità nei bambini, concentrandosi su variabili antropometriche e predittive.

## 1.2 Metodi di valutazione della maturità puberale

### 1.2.1 PHV – Peak Height Velocity

Il Peak Height Velocity (PHV) è il picco di velocità di crescita in altezza che si verifica durante la pubertà e rappresenta il momento di massima velocità di crescita nel periodo adolescenziale, in cui gli adolescenti sperimentano il più rapido incremento di altezza in un breve lasso di tempo (Mirwald et al., 2002). Questo evento è parte del processo di maturazione biologica e segna un'importante fase di sviluppo somatico e scheletrico. L'inizio del PHV è influenzato sia da fattori genetici che ambientali, inclusi clima, influenze culturali e ambiente sociale. L'inizio del PHV è un punto di riferimento che fornisce informazioni preziose per allenare i sistemi energetici degli atleti e il sistema nervoso centrale (SNC), indipendentemente dall'età cronologica (Balyi et al., 2004).

Il PHV rappresenta una fase cruciale nello sviluppo adolescenziale e può essere misurato in modo diretto attraverso il monitoraggio della crescita nel tempo o stimato con metodi indiretti, come equazioni predittive e radiografie. La sua stima accurata è essenziale per la gestione dell'allenamento, soprattutto negli sport giovanili, per adattare i programmi di allenamento alla fase di sviluppo dell'atleta e prevenire infortuni dovuti a un carico eccessivo durante questo delicato periodo di crescita.

Balyi et al., (2004) suggerisce di utilizzare l'inizio del picco di velocità di crescita (PHV) come punto di riferimento per la progettazione di programmi individuali ottimali in relazione a periodi "critici" o "sensibili" di maggiore sensibilità all'allenamento durante il processo di maturazione. Anche Lloyd et al. (2012) nel suo modello di sviluppo a lungo termine degli atleti (LTAD), prende in considerazione lo stato di maturazione del bambino e offre un approccio più

strategico allo sviluppo atletico dei giovani. Così facendo, si potrebbero considerare i bambini in base allo stato biologico anziché all'età cronologica.

Mills et al. (2016) ha specificato che i metodi radiografici si sono dimostrati i più affidabili per prevedere il PHV, con l'ossificazione del gomito e del calcagno che hanno anticipato il PHV di circa 10-12 mesi con elevata affidabilità (ICC 0,90-0,96). I metodi basati su equazioni, pur mostrando un'accuratezza inferiore, potrebbero migliorare se applicati con più anni di dati. I metodi antropometrici, come la lunghezza del piede, mostrano potenziale, ma richiedono ulteriori studi per confermarne l'affidabilità.

L'età al picco di velocità di crescita (PHV) rappresenta l'età cronologica in cui si verifica il massimo tasso di crescita in altezza durante lo scatto di crescita adolescenziale. Questo processo inizia con l'accelerazione del tasso di crescita in altezza (take-off), prosegue fino a raggiungere un picco (PHV) e poi decelera, terminando generalmente verso la tarda adolescenza o i primi vent'anni. (Mirwald et al., 2002). Prima dell'inizio del PHV, ragazzi e ragazze possono allenarsi insieme e l'età cronologica può essere utilizzata per determinare programmi di allenamento, competizione e recupero. L'età media per l'inizio del PHV è di 12 e 14 anni rispettivamente per femmine e maschi. (Balyi et al., 2004)

Nello studio di Philippaerts et al. (2006), il PHV è stato determinato utilizzando curve di crescita polinomiali per stimare la velocità di crescita in intervalli semestrali. Il PHV è stato definito come il punto di massima velocità registrata nella crescita in altezza, con un valore medio di 9,7 cm/anno a un'età media di 13,8 anni. Il Peak Weight Velocity (PHW) è la velocità massima di crescita in peso, che in questo studio è stata misurata utilizzando un metodo simile a quello per il PHV, attraverso curve di crescita polinomiali. Il PHW è coinciso con il PHV, con una velocità di crescita media in peso di 8,4 kg/anno. Per calcolare PHV e PHW, è stato applicato un modello matematico polinomiale non smussato, modificato da precedenti studi (Beunen et al., 1988).

Philippaerts et al. (2006) ha evidenziato come la maggior parte delle prestazioni fisiche nei giovani calciatori raggiunga il proprio massimo sviluppo in coincidenza con il PHV, suggerendo che questa fase di crescita rappresenti un momento critico per l'ottimizzazione del potenziale atletico. Tuttavia, alcune capacità fisiche, come la forza esplosiva e l'endurance, continuano a migliorare anche dopo il PHV, probabilmente grazie all'influenza combinata della crescita muscolare e dell'allenamento specifico (Philippaerts et al., 2006). I risultati sottolineano l'importanza di un monitoraggio individualizzato della crescita e delle prestazioni durante l'adolescenza, poiché il timing e il ritmo di sviluppo variano significativamente tra gli atleti

(Philippaerts et al., 2006). Ciò ha rilevanti implicazioni pratiche per l'identificazione e lo sviluppo del talento, suggerendo che i programmi di allenamento debbano essere adattati in base allo stato maturativo di ciascun atleta, anziché essere standardizzati per gruppi di età. Tuttavia, il tempo previsto prima del PHV e l'età al PHV tendono ad aumentare con l'età cronologica al momento della previsione, e l'età prevista al PHV presenta una gamma di variazione ridotta (Bergeron et al., 2015).

Peraltro, la tempistica e la magnitudine del PHV e delle velocità di picco dei tessuti variano significativamente tra i sessi e tra i diversi gruppi di maturazione. Iuliano-Burns et al. (2001) hanno descritto nel loro studio come i maschi hanno raggiunto il PHV più tardi rispetto alle femmine, ma con una maggiore magnitudine di crescita in altezza e tessuti corporei. I risultati suggeriscono inoltre che i maturatori precoci tendono a presentare una maggiore velocità di crescita rispetto ai maturatori tardivi. Tuttavia, le differenze osservate nel PHV tra i gruppi di maturazione non si traducono necessariamente in differenze significative in altezza o massa corporea nell'età adulta. Questi risultati evidenziano l'importanza di considerare la maturazione individuale nel monitoraggio dello sviluppo fisico durante l'adolescenza, con potenziali implicazioni per la pianificazione di interventi nutrizionali e di allenamento ottimizzati per il supporto allo sviluppo scheletrico e muscolare.

L'età al PHV può essere stimata attraverso misurazioni ripetute dell'altezza, effettuate annualmente o semestralmente durante l'adolescenza. (Mirwald et al., 2002). Secondo Malina et al. (2020) il PHV è uno degli indicatori non invasivi più comunemente usati per stimare il timing della maturazione. In un dato momento della crescita di un individuo (al momento dell'osservazione), l'altezza attuale viene confrontata con l'altezza adulta che si prevede raggiungerà alla fine dello sviluppo. Questa altezza prevista viene stimata in base a diversi fattori come età, altezza attuale, e, in alcuni casi, l'altezza dei genitori.

L'altezza attuale espressa come percentuale dell'altezza adulta fornisce un'indicazione del livello di maturità biologica: più un giovane è vicino alla sua altezza adulta, più è considerato maturo. Ad esempio, se un ragazzo ha già raggiunto il 90% della sua altezza adulta prevista, è più maturo rispetto a un altro ragazzo che ha raggiunto solo il 70%. Questo metodo ha mostrato una moderata concordanza con le classificazioni basate sull'età scheletrica, in particolare in giovani giocatori di football americano e calciatori. (Bergeron et al., 2015)

Le equazioni di previsione dell'altezza sono state sviluppate principalmente su popolazioni di ascendenza europea, limitando così la loro applicabilità globale. Inoltre, la variazione etnica nell'altezza da seduti e nella lunghezza delle gambe rappresenta un potenziale fattore

confondente nelle equazioni di previsione. (Bergeron et al., 2015) Misurando obiettivamente i tassi di cambiamento in altezza e massa corporea, si suggerisce che i bambini possano essere allenati in base allo stato biologico anziché all'età cronologica (Balyi et al., 2004).

Monasterio et al. (2024) ha dimostrato che la valutazione visiva delle curve di crescita rappresenta un metodo più accurato per stimare lo stato di maturità nei giovani calciatori d'élite rispetto alle equazioni predittive di Mirwald e Moore, che tendono a sovrastimare o sottostimare la maturazione, in particolare nei maturatori precoci o tardivi. La procedura utilizzata per la valutazione visiva si basava su dati longitudinali di altezza raccolti regolarmente dagli atleti. Questi dati venivano utilizzati per tracciare curve di crescita individuali, rappresentando l'altezza in funzione del tempo per ciascun atleta monitorato nel corso degli anni. Un esperto, con tre anni di esperienza come Head of Growth and Maturation, ha osservato queste curve identificando visivamente tre fasi principali: la fase di crescita iniziale, la fase di PHV e la fase successiva, in cui la velocità di crescita rallentava. Questa analisi permetteva di determinare con maggiore precisione il momento del PHV, classificando ciascun atleta come pre-, circa- o post-PHV.

In alternativa, quando i dati longitudinali completi non erano disponibili, si utilizzava la percentuale di altezza adulta predetta (%PAH) come metodo di stima. Per predire l'altezza adulta, veniva adottato principalmente il metodo Khamis-Roche (KR), un metodo non invasivo che si basa su variabili come l'età cronologica, l'altezza e il peso del giocatore, oltre all'altezza media dei genitori biologici. Le misurazioni di altezza e peso dovevano essere rilevate contemporaneamente per applicare correttamente le equazioni specifiche per il sesso. L'altezza predetta veniva poi espressa come percentuale dell'altezza adulta stimata, nota come %PAH.

Nello studio di Monasterio et al. (2024), bande di %PAH più ampie (85%-96%) si sono dimostrate utili per identificare i giocatori nella fase circa-PHV, mentre bande più strette (88%-93%) erano più accurate per distinguere i giocatori nelle fasi pre- e post-PHV. Questo approccio ha fornito un metodo pratico e relativamente preciso per stimare la fase di maturazione anche quando i dati longitudinali non erano completi o disponibili.

Un altro metodo spesso utilizzato è quello di Khamis-Roche (KR). È un metodo predittivo non invasivo utilizzato per stimare l'altezza adulta di bambini e adolescenti. Questo metodo si basa su parametri semplici e facilmente ottenibili, come l'altezza e il peso attuali del soggetto, l'età cronologica e l'altezza media dei genitori (altezza media dei genitori biologici). È uno dei metodi più utilizzati per la previsione dell'altezza futura nei giovani perché non richiede l'uso di strumenti invasivi o complessi, come le radiografie per determinare l'età scheletrica. Le

equazioni sviluppate da Khamis e Roche sono specifiche per sesso, e l'uso di tutte le variabili permette di stimare la percentuale di altezza adulta predetta (%PAH) e l'altezza adulta finale stimata (PAS). La previsione dell'altezza adulta predetta (%PAH) si ottiene confrontando l'altezza attuale con quella stimata e utilizzando percentuali specifiche per determinare lo stato di maturità del soggetto. (Khamis et Roche, 1994).

La formula di previsione dell'altezza adulta tramite il metodo Khamis-Roche è la seguente:

Altezza adulta predetta =  $\beta_0 + (\beta_1 \times \text{Altezza attuale}) + (\beta_2 \times \text{Peso}) + (\beta_3 \times \text{Altezza media dei genitori})$

Dove:  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , e  $\beta_3$  sono i coefficienti di regressione che variano in base al sesso e all'età del soggetto (presenti nel paper originale Khamis et Roche, 1994; tabelle 1-2.)

Lo studio di Fragoso et al. (2014), ha confermato che il metodo Khamis-Roche può essere considerato uno strumento affidabile per stimare l'altezza adulta e la percentuale di altezza adulta nei soggetti con maturazione nella media in quanto tende a sottostimare l'altezza adulta nei soggetti con maturazione tardiva e a sovrastimarla nei soggetti con maturazione precoce. Tuttavia, per i soggetti con maturazione precoce o tardiva, la previsione può essere meno accurata a causa della "normalizzazione" implicita nelle equazioni di Khamis-Roche, che non tengono pienamente conto delle variazioni individuali nel ritmo di crescita. Tuttavia, Fragoso et al. (2014) evidenzia l'importanza di considerare metodi complementari, come l'età scheletrica, soprattutto nei soggetti che non seguono un percorso di crescita standard. La combinazione di metodi predittivi non invasivi, come il Khamis-Roche, con metodi più accurati come il TW3, offre una stima più precisa della maturità biologica e dell'altezza adulta nei giovani atleti.

Una systematic review di Sullivan et al. (2023) ha confrontato metodi invasivi (come radiografie e risonanze magnetiche per l'età scheletrica) con metodi non invasivi (come le equazioni di maturità offset e predizione dell'altezza adulta) per determinare quali siano i metodi più efficaci e affidabili per prevedere il picco di PHV e stimare l'altezza adulta nei calciatori adolescenti, oltre che esplorarne l'affidabilità.

Nella review sono stati analizzati sia metodi invasivi che non invasivi per la valutazione della maturità biologica nei giovani calciatori. Tra i metodi invasivi, le radiografie (X-ray) delle ossa della mano e del polso sono state identificate come il "gold standard" per stimare l'età scheletrica, con un'elevata affidabilità (ICC fino a 0,98). Anche la risonanza magnetica (MRI), sebbene non implichi esposizione a radiazioni, è stata considerata un metodo preciso per determinare la maturità ossea, con un ICC di 0,828. La DXA (assorbimetria a raggi X a doppia

energia) ha dimostrato un'elevata affidabilità per la valutazione dello sviluppo osseo, con un ICC compreso tra 0,95 e 0,97, ma richiede attrezzature specifiche.

Secondo gli autori, i metodi non invasivi come l'equazione di Khamis-Roche, che ha mostrato un margine di errore di circa  $\pm 1$  cm, sono strumenti pratici per stimare l'altezza adulta e l'età al PHV nei giovani calciatori. Tuttavia, come visto precedentemente, confermano una certa variabilità, soprattutto nei casi di maturazione precoce o tardiva, dove tendono a essere meno precisi rispetto ai metodi invasivi basati sull'imaging medico. Il metodo %PAH è stato valutato per la sua efficacia nel prevedere l'altezza adulta nei giovani calciatori. I risultati indicano che questo metodo offre un'affidabilità moderata nella stima dell'altezza finale, ma presenta una maggiore variabilità rispetto ad altri metodi, in particolare nei soggetti con maturazione precoce o tardiva.

In dettaglio, i metodi basati su %PAH mostrano una correlazione moderata con l'età scheletrica e altri parametri invasivi, con una concordanza che varia tra il 57% e il 68%. Questo evidenzia l'utilità pratica del metodo %PAH, ma suggerisce che in alcuni casi, come nei soggetti con maturazione precoce o tardiva, la precisione può essere compromessa.

Peraltro, le discrepanze osservate tra i metodi non invasivi e invasivi sono attribuibili alle differenze nei campioni di riferimento e nella complessità delle variabili considerate. I metodi non invasivi tendono a essere più generalizzati, mentre i metodi invasivi considerano meglio la variabilità individuale, come lo sviluppo osseo.

Tuttavia, l'uso di metodi non invasivi come Khamis-Roche e Mirwald è raccomandato nei contesti sportivi, dove le risorse per esami invasivi sono limitate. Tuttavia, per una maggiore precisione, è preferibile utilizzare metodi invasivi come l'età scheletrica determinata da radiografie o risonanze magnetiche.

La revisione ha evidenziato una scarsa concordanza tra metodi invasivi e non invasivi, il che suggerisce che questi metodi non dovrebbero essere utilizzati in modo intercambiabile. Inoltre, la maggior parte degli studi inclusi nella revisione è stata condotta in campioni di popolazione europea, limitando la generalizzabilità dei risultati ad altre etnie.

In conclusione, si consiglia di utilizzare metodi predittivi non invasivi per stimare la maturazione biologica nei calciatori adolescenti, ma di affiancarli, dove possibile, a metodi invasivi.

### 1.2.2 Equazioni predittive

Il metodo proposto da Mirwald et al. (2002) per la valutazione della maturità puberale si basa sull'uso di equazioni predittive che stimano lo scarto di maturità (ovvero il tempo trascorso rispetto al PHV) utilizzando variabili antropometriche facilmente misurabili. Tali variabili includono l'età cronologica, l'altezza totale, l'altezza da seduto e la massa corporea. Il PHV rappresenta un punto di riferimento che identifica il momento di massima velocità di crescita durante la pubertà, un parametro cruciale per la valutazione del timing della maturazione biologica (Mirwald et al., 2002).

Le equazioni di regressione multipla, sviluppate separatamente per ragazzi e ragazze, considerano anche le interazioni tra le variabili antropometriche, come il rapporto tra lunghezza delle gambe e altezza da seduto, il quale cambia in modo caratteristico prima e dopo il PHV. Un rapporto crescente indica che l'individuo si trova nel periodo pre-PHV, mentre un rapporto decrescente suggerisce che l'individuo è nel periodo post-PHV. Questo approccio permette di stimare la maturità biologica con un margine di errore di circa  $\pm 1$  anno nel 95% dei casi, rendendo il metodo non invasivo, pratico e sufficientemente accurato per essere applicato in contesti di ricerca o di classificazione sportiva giovanile (Mirwald et al., 2002).

L'utilizzo di tale modello consente di superare i limiti legati all'uso esclusivo dell'età cronologica nella classificazione della maturità e fornisce un'alternativa praticabile alle metodologie invasive o intrusivamente cliniche come la valutazione delle caratteristiche sessuali secondarie o l'età scheletrica.

Citando le equazioni di Mirwald et al. (2002):

Per i ragazzi,

maturity offset = - 9.236 + 0.0002708·Leg Length and Sitting Height interaction - 0.001663·Age and Leg Length interaction + 0.007216·Age and Sitting Height interaction + 0.02292·Weight by Height ratio, where R = 0.94, R<sup>2</sup> = 0.891, and SEE = 0.592.

Per le ragazze,

maturity offset = - 9.376 + 0.0001882·Leg Length and Sitting Height interaction + 0.0022·Age and Leg Length interaction + 0.005841·Age and Sitting Height interaction - 0.002658·Age and Weight interaction + 0.07693·Weight by Height ratio, where R = 0.94, R<sup>2</sup> = 0.890, and SEE = 0.569.

Secondo gli autori, le equazioni predittive rappresentano un metodo pratico e non invasivo per stimare la maturità biologica negli adolescenti. Tuttavia, devono essere utilizzate con attenzione, assicurandosi di rispettare procedure di misurazione standardizzate e considerando la variabilità interindividuale nel timing della crescita. Inoltre, suggeriscono che, oltre alla previsione continua dello scarto di maturità in anni dal PHV, un'alternativa sarebbe classificare gli individui in categorie di maturità biologica (ad esempio, pre-PHV e post-PHV). Questo potrebbe essere particolarmente utile in contesti sportivi o di ricerca, dove una categorizzazione chiara potrebbe migliorare l'organizzazione e la gestione delle attività.

Malina et al. nel 2020 ha evidenziato che le equazioni di previsione dell'offset di maturità e dell'età al PHV sono utili per stimare la maturazione biologica nei giovani con maturazione media, ma mostrano limitazioni significative nei soggetti con maturazione precoce o tardiva. Nello specifico, evidenzia le equazioni di Moore come più accurate rispetto a quelle di Mirwald, soprattutto nei maturatori tardivi, sebbene entrambe le equazioni abbiano mostrato una minore precisione nei casi di maturazione atipica.

Le equazioni di Moore per la previsione dell'offset di maturità e dell'età al Peak Height Velocity (PHV) sono le seguenti: (Malina et al., 2020)

Per i ragazzi (Moore-1):

$$\text{Offset di maturità (anni)} = -8.128741 + 0.0070346 \times (\text{Età cronologica} \times \text{Altezza seduta})$$

$$\text{Offset di maturità (anni)} = -8.128741 + 0.0070346 \times (\text{Età cronologica} \times \text{Altezza seduta})$$

Per i ragazzi (Moore-2, equazione alternativa):

$$\text{Offset di maturità (anni)} = -7.999994 + 0.0036124 \times (\text{Età cronologica} \times \text{Altezza})$$

$$\text{Offset di maturità (anni)} = -7.999994 + 0.0036124 \times (\text{Età cronologica} \times \text{Altezza})$$

Per le ragazze:

$$\text{Offset di maturità (anni)} = -7.709133 + 0.0042232 \times (\text{Età cronologica} \times \text{Altezza})$$

$$\text{Offset di maturità (anni)} = -7.709133 + 0.0042232 \times (\text{Età cronologica} \times \text{Altezza})$$

Le equazioni predittive di Mirwald e Moore rappresentano strumenti preziosi per stimare la maturità biologica in contesti sportivi giovanili, offrendo un metodo pratico ed economico, non invasivo e applicabile su larga scala. Queste equazioni consentono di superare i limiti derivanti dall'uso esclusivo dell'età cronologica, fornendo una stima della fase di crescita di un atleta e contribuendo a una migliore organizzazione delle attività sportive e alla gestione del carico di

allenamento in base alla maturità fisiologica. Tuttavia, come evidenziato da Monasterio et al. (2024), le equazioni predittive presentano delle limitazioni, soprattutto nei casi di maturazione precoce o tardiva. Monasterio ha riscontrato che tali equazioni hanno classificato erroneamente tra un terzo e metà dei giocatori, con performance peggiori nei soggetti con maturazione precoce e tardiva. Pertanto, pur essendo strumenti utili, è fondamentale utilizzarli con cautela, assicurandosi di rispettare le procedure di misurazione standardizzate e di considerare la variabilità interindividuale nel timing della crescita. In definitiva, le equazioni di Mirwald e Moore possono essere efficaci per la maggior parte degli atleti, ma devono essere integrate con una valutazione individualizzata per garantire decisioni più accurate e personalizzate.

### 1.2.3 L'età scheletrica

L'età scheletrica è un indicatore della maturazione dello scheletro della mano e del polso, ottenuto tramite una radiografia standard. È la stima più utile dello stato di maturità e può essere utilizzata dall'infanzia fino alla tarda adolescenza. Può anche essere utilizzata con l'attuale altezza corporea e/o l'altezza media dei genitori per prevedere l'altezza matura, che è di interesse in alcuni sport (Bergeron et al., 2015).

I cambiamenti di ciascun osso, dall'ossificazione iniziale fino allo stato maturo, segnano il progresso dall'immaturità alla maturità. Tuttavia, questo metodo presenta alcuni limiti, tra cui il costo e l'esposizione minima alle radiazioni, oltre alla mancanza di personale qualificato per gestire correttamente i protocolli di valutazione e interpretazione. Con le tecnologie moderne, l'esposizione alle radiazioni è comunque molto ridotta (circa 0,001 millisievert), inferiore alla radiazione di fondo quotidiana e paragonabile a tre ore di visione televisivi. (Mirwald et al., 2002):

Esistono tre metodi principali per stimare l'età scheletrica:

1. Greulich-Pyle (GP), sviluppato su bambini di status socioeconomico più elevato a Cleveland, Ohio.
2. Tanner-Whitehouse (TW), inizialmente sviluppato su bambini britannici (TW1, TW2), con l'ultima versione (TW3) che incorpora dati su bambini provenienti da diverse nazioni, tra cui Regno Unito, Belgio, Spagna, Italia, Argentina, Giappone e un campione di giovani americani di status socioeconomico elevato.
3. Fels, sviluppato attraverso lo studio longitudinale sulla crescita di Fels, su bambini della classe media dell'Ohio meridionale.

Serinelli et al. (2011) ha evidenziato, in una systematic review e meta-analysis, che i metodi Tanner-Whitehouse (TW2 e TW3) sono i più accurati nella stima dell'età scheletrica, con una sottostima minima rispetto all'età cronologica. Il metodo Greulich e Pyle (GP), sebbene ampiamente utilizzato, ha mostrato una maggiore variabilità e una tendenza alla sovrastima, mentre il metodo Fels ha prodotto stime con un margine di errore più ampio rispetto agli altri metodi. Le età scheletriche ottenute con ciascun metodo non sono equivalenti, a causa delle differenze nei protocolli e nei campioni di riferimento. L'età scheletrica riflette l'età cronologica alla quale un certo livello di maturità delle ossa della mano e del polso è stato raggiunto nel campione di riferimento.

Rüeger et al. (2022) ha condotto una revisione sistematica per valutare l'uso della tecnologia a ultrasuoni nell'identificazione della maturità biologica negli adolescenti. Tra i metodi valutati, la stima della maturità ossea attraverso gli stadi di ossificazione, in particolare del polso, della mano e della cresta iliaca (segno di Risser), ha dimostrato una buona validità e affidabilità. Tuttavia, altre metodiche, come la misurazione dello spessore della cartilagine della testa femorale, non hanno mostrato risultati sufficientemente affidabili per essere applicate su larga scala. Nonostante i progressi, un limite comune delle metodiche ecografiche è la mancanza di precisione nella stima dell'età ossea decimale, con la maggior parte dei metodi che suddividono i soggetti in stadi di maturità piuttosto che fornire una valutazione numerica precisa.

Recentemente, Ferrillo et al. (2021), attraverso una revisione sistematica, ha confrontato la maturazione vertebrale cervicale (CVM) e la maturazione mano-polso (HWM) per la valutazione della maturità scheletrica. I risultati indicano una correlazione significativa tra la valutazione della CVM e HWM nella maggior parte degli studi.

Anche una revisione sistematica di Lucchese et al. (2023) ha valutato l'efficacia del metodo di maturazione vertebrale cervicale (CVM), confrontandolo con altri metodi, nel prevedere il picco di crescita puberale. I risultati hanno evidenziato una forte correlazione tra il metodo di maturazione vertebrale cervicale (CVM) e altri metodi di valutazione della maturità scheletrica, in particolare la maturazione mano-polso (HWM), con un tasso di riproducibilità variabile tra il 78% e il 98%. Il CVM ha mostrato una correlazione significativa con l'altezza corporea, suggerendo che il picco di crescita si verifica tra gli stadi III e IV del CVM, con una precisione del 100% nei maschi e dell'87% nelle femmine. Inoltre, il CVM ha mostrato una buona correlazione con l'età dentale, con valori di correlazione maggiori nei maschi rispetto alle femmine. Anche il confronto tra CVM e la falange media del terzo dito (MP3) ha dimostrato

una correlazione positiva, confermando l'affidabilità del CVM nel predire la maturità scheletrica e il picco di crescita, riducendo la necessità di esami radiografici aggiuntivi.

Tuttavia, i metodi Greulich-Pyle (GP), Tanner-Whitehouse (TW) e Fels, presentano limitazioni significative nel contesto sportivo, in particolare nel calcio. Questi metodi richiedono l'uso di apparecchiature specializzate, che comportano costi elevati e la necessità di personale altamente qualificato per l'acquisizione e l'interpretazione delle immagini. Inoltre, l'esposizione ripetuta a radiazioni, seppur minima, non è sempre giustificabile in contesti non clinici. Questi fattori, insieme alla disponibilità limitata di strumentazioni nelle accademie calcistiche, rendono tali metodiche difficilmente applicabili a livello pratico per la valutazione della maturità biologica degli atleti. Di conseguenza, l'uso di tecniche meno invasive, rapide e facilmente accessibili risulta preferibile in ambito sportivo.

#### 1.2.4 Biomarcatori

In una systematic review and meta-analysis, Kapoor et al. (2023) hanno analizzato l'uso dei biomarcatori presenti nei fluidi corporei (sangue, saliva, urina e fluido crevicolare gengivale) come indicatori della maturità scheletrica (Figura 1).

Il IGF-1 (Insulin-like Growth Factor-1) ha mostrato una correlazione significativa con le fasi di crescita puberale, raggiungendo il picco durante il CVMI 4 (Cervical Vertebral Maturation Index, una classificazione radiografica per determinare la maturità scheletrica), ovvero durante la fase di massima velocità di crescita. L'aumento dei livelli di IGF-1 è stato osservato nelle fasi CS3 e CS4 (Cervical Stages, che indicano le diverse fasi di maturazione delle vertebre cervicali), con valori significativamente più alti rispetto alle fasi prepuberali (CS1 e CS2) e post-puberale (CS5 e CS6). Questa stretta correlazione con il PHV indica che l'IGF-1 può essere un indicatore affidabile per monitorare la crescita scheletrica nei maschi durante l'adolescenza.

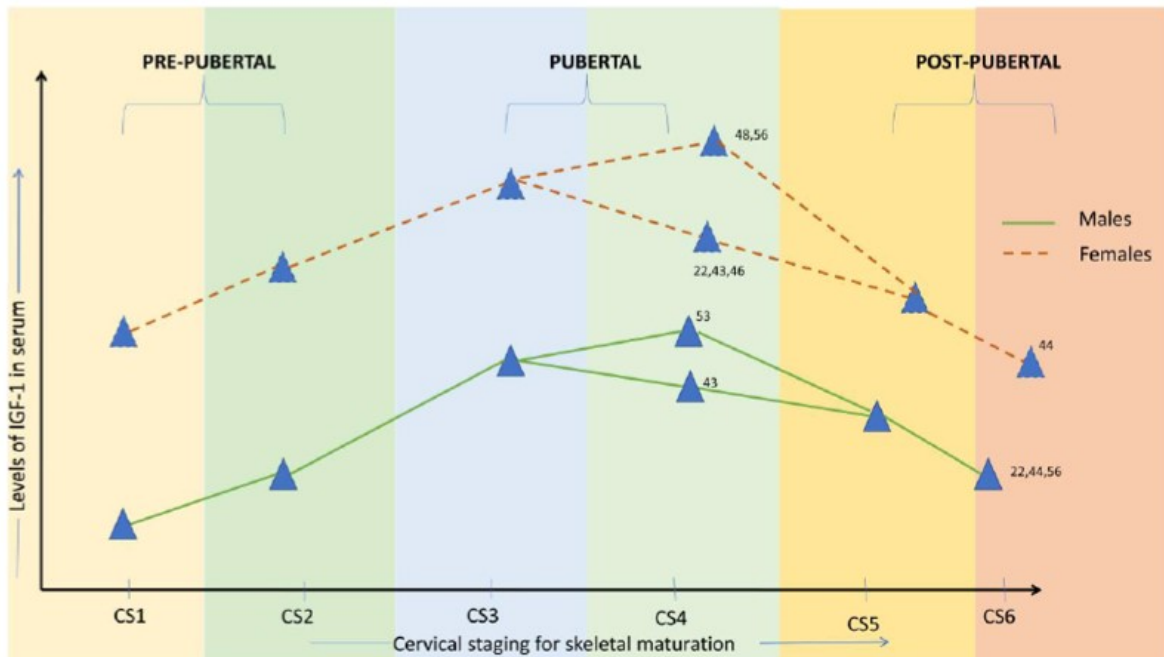


Figura 1– Livelli di IGF-1 e fasi di maturazione delle vertebre cervicali - Kapoor et al.(2023)

Per quanto riguarda il BALP (Bone-Specific Alkaline Phosphatase), i livelli di questo biomarcatore hanno raggiunto il picco durante il CVMI 3, anticipando leggermente l'IGF-1. La BALP ha dimostrato una correlazione altamente significativa con il PHV, rivelandosi uno degli indicatori più accurati per la previsione della maturità scheletrica e della crescita mandibolare nei maschi. La sua precisione è stata ritenuta maggiore rispetto all'IGF-1 nel predire la maturazione ossea.

L'osteocalcina ha mostrato un picco durante la fase CVMI 5 nei maschi, evidenziando un aumento sostanziale nelle fasi di crescita massima, con una forte correlazione con l'IGF-1. Questo biomarcatore ha quindi confermato la sua utilità come indicatore del tasso di rimodellamento osseo nelle fasi avanzate della pubertà maschile.

Infine, il DHEAS (Dehydroepiandrosterone sulfate) ha mostrato livelli più elevati durante la fase CS4 nei maschi, con un picco durante la crescita puberale, sebbene la sua correlazione con il PHV sia risultata meno precisa rispetto a quella di IGF-1 e BALP. Nonostante questo, DHEAS rimane un marcatore utile per identificare il periodo puberale e per valutare l'andamento generale della crescita.

Questi risultati indicano che i biomarcatori come IGF-1, BALP e osteocalcina, raccolti principalmente tramite sangue venoso, sono correlati strettamente con la maturazione

scheletrica e possono essere utilizzati per monitorare con precisione il PHV nei maschi, offrendo un'alternativa non invasiva ai metodi radiografici.

Di Luigi et al. (2006) hanno osservato che i livelli di testosterone salivare (sT) a riposo aumentano progressivamente con l'età cronologica e lo stadio puberale, riflettendo l'avanzamento della maturazione gonadica. Dopo l'esercizio, i livelli di testosterone salivare aumentano significativamente in quasi tutti gli stadi puberali, ma l'incremento percentuale risulta inversamente correlato con l'età e i livelli basali di testosterone. Questo suggerisce che i soggetti più giovani e meno maturi rispondano in modo più marcato agli stimoli da esercizio, evidenziando un'ipersensibilità del sistema endocrino nelle fasi iniziali della pubertà.

Per quanto riguarda il cortisolo salivare (sC), i livelli a riposo mostrano una correlazione positiva con l'età, ma la risposta all'esercizio fisico diminuisce con l'avanzare dell'età e dello stadio puberale. Questo indica che i soggetti più giovani, in stadi puberali meno avanzati, presentano una maggiore reattività dell'asse ipotalamo-ipofisi-surrene allo stress fisico rispetto agli atleti più maturi. Tale comportamento suggerisce una diversa modulazione endocrina dello stress durante le varie fasi della crescita.

Le differenze nei livelli di testosterone e cortisolo, così come nella loro risposta all'esercizio, evidenziano l'importanza di personalizzare le strategie di allenamento in base allo stadio di sviluppo biologico, piuttosto che alla sola età cronologica. Ciò permetterebbe di ottimizzare il rendimento atletico e ridurre il rischio di sovraccarico psicofisico, tenendo conto della variabilità individuale nel processo di maturazione.

### 1.2.5 PDS – Pubertal Development Scale

Carskadon et al. (1993) hanno redatto una scala auto-somministrata per misurare lo stato puberale nei bambini e adolescenti senza l'uso di rappresentazioni visive o interviste dirette. La scala è un adattamento della Pubertal Development Scale (PDS), originariamente basata sulle fasi di Tanner, ed è stata progettata per essere utilizzata in contesti educativi e di ricerca che richiedono strumenti non invasivi. La ricerca ha evidenziato una forte correlazione tra le auto-valutazioni (PDS) degli studenti e le valutazioni dei medici ( $r = 0,841-0,868$ ), indicando una buona corrispondenza tra i due metodi.

Perroni et al. (2014) hanno tradotto la versione inglese di Carskadon e Acebo (1993) e trovato un buon alfa di Cronbach (0,85) per coerenza interna. Il questionario richiede ai giocatori di rispondere, individualmente, a cinque domande riguardanti l'importo del cambiamento o

sviluppo di diverse caratteristiche fisiche (crescita dei peli del viso e del corpo, alterazioni della pelle, voce più profonda e scatto di crescita) associata alla maturazione puberale utilizzando una scala Likert a quattro punti (cioè, nessuno sviluppo = 1; sì, appena = 2; sì, sicuramente = 3; nessuno sviluppo = 4). Lo sviluppo sarà ricavato sommando il punteggio ottenuto sulle cinque caratteristiche e poi dividendole per cinque. Inoltre, sulla base dei valori riportati di crescita dei peli del corpo, peli del viso crescita e cambiamento della voce, è possibile calcolare lo stato puberale classificato in cinque categorie: pre-pubertà (nessun sviluppo su nessuna delle tre caratteristiche: un punteggio combinato di 3); inizio della pubertà (punteggio combinato di 4 o 5); metà pubertà (punteggio combinato di 6, 7 o 8); pubertà avanzata (punteggio combinato di 9, 10 o 11); post-pubertà (sviluppo completato di tutte e tre le caratteristiche: un punteggio combinato di 12).

Più recentemente Koopman-Verhoeff et al. (2020) la (PDS) auto-compilata e genitoriale con il metodo di valutazione della maturità Tanner, al fine di determinare l'affidabilità e la validità della PDS come strumento di autovalutazione della maturità puberale negli adolescenti. Secondo gli autori, la PDS ha mostrato un'alta consistenza interna (Cronbach's alpha tra 0,91 e 0,96) e una forte affidabilità tra test-retest (ICC tra 0,81 e 0,93), sia per le versioni auto-compilate che quelle compilate dai genitori. La validità di criterio rispetto al Tanner staging è stata moderata, con Kendall's Tau tra 0,67 e 0,76 e ICC tra 0,72 e 0,83. L'accordo assoluto tra la PDS e il Tanner staging è risultato basso, con Cohen's Kappa che variava da 0,20 a 0,37, suggerendo che la PDS non può mappare accuratamente le fasi Tanner specifiche, ma può essere utilizzata per classificare gli adolescenti in categorie pre-puberale, medio-puberale e post-puberale. Gli autori concludono evidenziando come la PDS risulti uno strumento valido e affidabile per la valutazione generale dello sviluppo puberale, ma senza sostituire completamente la valutazione clinica Tanner. Tuttavia, la PDS è sufficientemente robusta da essere utilizzata in studi su larga scala per classificare i partecipanti in ampie categorie di sviluppo puberale.

La PDS, grazie alla sua validità e affidabilità dimostrate, è stata ritenuta adeguata a classificare i giovani atleti in ampie categorie di sviluppo puberale senza necessità di valutazioni cliniche invasive.

### 1.3 L'importanza della valutazione della maturità nei giovani atleti per il benessere e la prevenzione degli infortuni

La valutazione della maturità biologica nei giovani atleti rappresenta un aspetto cruciale per garantire il loro benessere fisico e prevenire gli infortuni.

Se non considerati contestualmente alle strategie di allenamento, certi aspetti della maturazione possono predisporre alcuni atleti giovani ad infortuni specifici che coinvolgono la colonna vertebrale (ad esempio, spondilolisi, spondilolistesi), superfici articolari (osteocondrite dissecante) e apofisite da trazione (ad esempio, malattia di Osgood-Schlatter, malattia di Sever). A causa dei potenziali disturbi della crescita, le lesioni ai centri di crescita epifisaria sono di particolare preoccupazione. (Bergeron et al., 2015)

In egual misura, sia la capacità di allenamento aerobico che quella di forza dipendono dai livelli di maturazione; quindi, i maturatori precoci, medi o tardivi necessitano di diversi tempi per l'enfasi dell'allenamento (Balyi et al., 2004). Ad esempio, un bambino a maturazione precoce è stato definito come una ragazza o un ragazzo che inizia il picco di crescita adolescenziale circa 1,5 o 2 anni prima rispetto a un bambino a maturazione tardiva. (Lloyd et al., 2012)

Attualmente, la maggior parte delle decisioni metodologiche sull'allenamento sono prese in base all'età cronologica (gruppi di età) e non in base alle esigenze individuali di livello di maturazione. Peraltro, le ricerche hanno mostrato che l'età cronologica non è un buon indicatore su cui basare i modelli di sviluppo dell'atleta per atleti tra i 10 e i 16 anni. (Balyi et al., 2004)

La scelta dei corretti mezzi e metodi di allenamento devono basarsi su fattori intrinseci (ad es., altezza del corpo e tasso di maturazione, attitudine, adattamento all'allenamento, motivazione, abilità psicologiche) così come estrinseci (ad es., ambiente, accesso e opportunità, percorso di sviluppo dell'atleta, allenatori, famiglia, educatori) lavorando in sincronia per determinare il successo di un atleta nello sport. (Bergeron et al., 2015)

In questa direzione, il Comitato Olimpico Internazionale (2015) ha redatto alcuni principi guida, tra i quali vale la pena menzionare:

- Lo sviluppo di un giovane atleta dipende da una combinazione unica di fattori, tra cui la crescita fisica, la maturazione biologica e lo sviluppo comportamentale, che sono in costante cambiamento. Per questo motivo, ogni atleta deve essere considerato in modo individuale.

- È importante adottare modelli di sviluppo dell'atleta basati sull'evidenza scientifica, inclusivi e flessibili, che si adattino alle diverse fasi di crescita. Questi modelli dovrebbero accogliere i progressi individuali dell'atleta, rispondendo adeguatamente alle sue esigenze e prospettive specifiche.
- L'allenamento deve essere personalizzato e adattato al contesto in cui l'atleta si trova, che può variare tra il semplice coinvolgimento sportivo e il focus sulle prestazioni. Inoltre, deve essere allineato alla prontezza fisica e atletica di ciascun atleta.
- I programmi di sviluppo per giovani atleti dovrebbero includere una varietà di esperienze atletiche per favorire una crescita equilibrata e ridurre il rischio di infortuni da sovraccarico o altri problemi di salute legati ad allenamenti e competizioni inappropriate. È fondamentale garantire riposo e recupero adeguati a incoraggiare adattamenti positivi e favorire uno sviluppo atletico graduale e sicuro.

Numerosi studi (Balyi et al., 2004; Bergeron et al., 2015; Kemper et al., 2015; Lloyd et al., 2012; Rommers et al., 2020; Monasterio et al., 2021) hanno dimostrato che la crescita e lo sviluppo puberale sono fasi delicate durante le quali gli atleti, specialmente nei contesti giovanili, possono essere particolarmente vulnerabili a problemi fisici e infortuni, se non gestiti adeguatamente.

In una review, Ribeiro et al. (2024) esplora in che modo la crescita, la maturazione e il carico di lavoro influiscano sul rischio di infortuni nei giovani calciatori d'élite. Uno degli studi analizzati (Kemper et al., 2015) mostra che una crescita superiore a 7,2 cm all'anno è associata a un incremento del rischio di infortuni, soprattutto durante e intorno al periodo del PHV. Inoltre, l'aumento del Body Mass Index (BMI), in particolare di oltre 0,3 kg/m<sup>2</sup> al mese, è stato correlato con un aumento del rischio di infortuni, suggerendo che un cambiamento rapido nella composizione corporea possa rappresentare un fattore di rischio rilevante.

Studi successivi, come quello di Rommers et al. (2020), hanno confermato questi dati, indicando che un incremento della lunghezza degli arti inferiori, soprattutto nei ragazzi di età compresa tra 10 e 15 anni, è correlato a un aumento del rischio di infortuni da sovraccarico, in particolare a carico del ginocchio, anca e coscia. Inoltre, è stato osservato che tassi di crescita più lenti, associati a un incremento del peso corporeo, possono aumentare il rischio di infortuni acuti nei gruppi di età più avanzata.

Un ulteriore studio condotto da Rommers et al. (2021) ha dimostrato che la velocità di crescita è un predittore significativo del rischio di infortuni. In particolare, ogni aumento di 1 cm all'anno nel tasso di crescita comporta un incremento del 15% del rischio di infortunio. Questo dato è particolarmente rilevante per gli infortuni muscolari, con la coscia che si è dimostrata la struttura più frequentemente interessata da lesioni durante questo periodo di crescita accelerata. Un altro risultato importante riguarda il legame tra la maturazione biologica e il rischio di infortunio. Monasterio et al. (2021) ha osservato che gli infortuni legati alla crescita sono più frequenti durante i periodi pre-PHV e circa-PHV, mentre gli infortuni muscolari e articolari sono più comuni nel periodo post-PHV, con un'incidenza significativamente maggiore nei giocatori che hanno raggiunto una percentuale maggiore dell'altezza adulta prevista.

Un ulteriore aspetto cruciale durante la maturazione biologica è l'adattamento coordinato tra muscolo e tendine (Mersmann et al., 2017). Questo processo integrato permette al sistema muscolo-scheletrico di gestire le crescenti sollecitazioni meccaniche durante l'attività sportiva, garantendo che la forza sviluppata dal muscolo venga trasmessa in modo efficiente attraverso il tendine, mantenendo l'equilibrio tra capacità contrattile e resistenza meccanica (Mersmann et al., 2017). L'assenza di tale coordinazione potrebbe portare a un sovraccarico del tendine, aumentando il rischio di infortuni (Mersmann et al., 2017).

Come sottolineato da Mersmann et al. (2017), durante l'adolescenza la forza muscolare aumenta rapidamente, ma l'adattamento del tendine tende a verificarsi in modo più marcato nella tarda adolescenza. Questo ritardo nell'adattamento del tendine può generare squilibri tra la forza muscolare e la capacità di carico tendineo, aumentando il rischio di lesioni (Mersmann et al., 2017). I risultati di questo studio indicano l'importanza di sviluppare strategie di allenamento specifiche che favoriscano l'adattamento del tendine fin dalle prime fasi della carriera atletica. In particolare, questo è cruciale per sport ad alta intensità, come quelli caratterizzati da frequenti salti, dove la prevalenza di lesioni tendinee è elevata.

Ulteriori fattori di rischio come lo sviluppo di schemi di identificazione e sviluppo del talento e specializzazione precoce hanno avuto come conseguenza un'escalation continua di infortuni e problemi di salute correlati allo sport a tutti i livelli dello sport giovanile (Bergeron et al., 2015). I bambini che partecipano a una varietà di sport e si specializzano solo dopo aver raggiunto l'età della pubertà, ad esempio, tendono ad essere performer più consistenti, hanno meno infortuni e aderiscono più a lungo allo sport rispetto a quelli che si specializzano presto (Bergeron et al., 2015). Altre conseguenze sono il burnout dell'atleta e il conseguente abbandono dallo sport (Bergeron et al., 2015).

La formazione degli allenatori dovrebbe sottolineare l'importanza di creare ambienti sportivi che promuovano l'autonomia e la padronanza delle abilità. Questo approccio riduce lo stress e favorisce una maggiore motivazione intrinseca, un aspetto cruciale soprattutto nello sport giovanile d'élite, dove la pressione per ottenere risultati può essere molto alta e contribuire ad aumentare il rischio di infortuni. (Bergeron et al., 2015)

Concludendo, la valutazione della maturità biologica nei giovani atleti risulta fondamentale per garantire il loro benessere psico-fisico e prevenire infortuni.

Gli studi citati indicano chiaramente che la fase di PHV e i rapidi cambiamenti fisici associati alla maturazione biologica sono i momenti di maggiore rischio per gli infortuni nei giovani calciatori. La capacità di monitorare la crescita e adattare il carico di lavoro durante questi periodi critici risulta cruciale per prevenire infortuni. Risulta prioritaria l'importanza di identificare precocemente gli atleti a rischio attraverso un monitoraggio regolare delle misure antropometriche e della maturazione biologica, al fine di implementare strategie preventive mirate.

Infine, suggeriscono che il rischio di infortuni è strettamente correlato alla velocità di crescita, alla maturazione e al carico di lavoro. Gli interventi preventivi dovrebbero concentrarsi su una gestione attenta di questi fattori per ottimizzare lo sviluppo fisico degli atleti, ridurre l'incidenza degli infortuni ed all'eventuale drop-out\burnout. Solo attraverso un approccio olistico e individualizzato sarà possibile favorire uno sviluppo atletico equilibrato e sostenibile, riducendo il rischio di infortuni e garantendo una partecipazione sportiva a lungo termine.

## 2. Studio 1 – Assessment of Performance in Youth Soccer Players: Should We Consider the Maturation Status?

### 2.1 Introduction

Talent identification refers to a complex process that arises from multiple factors that operate in various ways to identify individuals who have the potential to become elite players (Williams and Reilly, 2000). Those recognized as talented are given an invitation to join development programs where they can access a suitable learning environment that will enable them to fully develop their potential (Reilly et al., 2000). Both processes of identifying and developing young talents have become topics of interest in modern soccer (Carling et al., 2009). Evidence-based support systems, that take a comprehensive approach for talent identification and development, have emerged and are gradually replacing the dominant, non-scientific model of identifying promising youth soccer players based on the coach's subjective preconceived notion of the ideal player, which is limited in consistency and results in repetitive misjudgments (Williams and Reilly, 2000). Such holistic models consider the players' physical, technical, and psychosocial attributes and are essential in successful talent identification and development environments, but are also likely to be a fertile area for additional research (Kelly and Williams, 2020; Vaeyens et al., 2008). There is speculation that the influence of relative age and biological maturation could negatively impact traditional and modern approaches to talent identification and development (Smith et al., 2018). Relative age refers to the variation in chronological age within a specific age group, which is determined by comparing individuals' dates of birth and the cutoff dates for that particular age group (Hill et al., 2020). Since youth athletes are traditionally grouped by chronological age (e.g., U10, U11, U12, etc.) to provide fair competition and equal opportunity, there could be a considerable age gap of up to 12 months among participants within the same cohort. Such a scenario is even more problematic when biological maturation is neglected (Hill et al., 2020). The advancement towards the state of maturity or adulthood that is characterized by status, timing and tempo can be referred to as biological maturation (for details, see Malina et al., 2019). Large interindividual variability rates characterize biological maturation and indicate that children within the same chronological age do not mature simultaneously, with some individuals maturing in advance or delayed relative to their peers (Jackowski et al., 2011). Such considerable variability in somatic and biological growth has often been described in the literature (Hill et al., 2020), with potential consequences

for variables associated with soccer performance (Kelly et al., 2021). Evidence suggests that there are significant advantages in height, lean body mass and components associated with performance in individuals with advanced maturity status (Figueiredo et al., 2009; Selmi et al., 2020; Vaeyens et al., 2006). Hence, player selection biases may occur due to relative age and biological maturation and cause profound impacts on talent identification and development programs. Relative age and biological maturation should be acknowledged as separate constructs that exist and function independently. Such consideration might avoid potential selection biases and optimize processes for identifying and developing young talents in professional soccer academies (Hill et al., 2020). Recently, promising approaches have been developed and tested to group young soccer players based on their biological maturation instead of their chronological age (Cumming et al., 2017). These new competitive formats offer advantages for talent identification and development programs (Malina et al., 2019). However, implementing such innovative approaches in soccer is challenging since it requires appropriate methods that meet ethical and economically pragmatic criteria to assess biological maturity status (Leyhr et al., 2020). Biological maturity status in youth athletes is commonly determined using various methods, categorized into skeletal, sexual or somatic maturity indicators (Baxter-Jones et al., 2005). Despite the accuracy of methods utilized in evaluating biological maturation, their effectiveness is constrained by factors such as equipment accessibility, analysis proficiency requisites, assessment methods' invasiveness, as well as legal and ethical concerns coupled with time and financial restraints (Lloyd et al., 2014). To overcome such barriers, at least in part, Petersen et al. (1988) developed a scale that continuously measures pubertal status and significantly correlates with other methods of biological maturation. This scale, known as Pubertal Developmental Scale (PDS), includes questions on the gonads, adrenals, and growth factors that change the body during the pubertal period (Petersen et al., 1988). The PDS has been recently introduced as a valuable tool for estimating pubertal development in soccer studies (Perroni et al., 2018, 2019, 2023). However, it is currently unknown whether the PDS-derived measures of pubertal status are significantly related, and comparable to those found for chronological age and relative age, to the physical capabilities of soccer players. Hence, the present study investigated the relationships of chronological age, relative age, and PDS-derived pubertal status measures with selected performance variables in young soccer players.

## 2.2 Materials and methods

### Participants

Sixty-one well-trained young male soccer players (mean age:  $13.5 \pm 0.6$  years; body height:  $169.0 \pm 8$  cm; body mass:  $59.0 \pm 10$  kg) from amateur ( $n = 36$ ) and professional ( $n = 26$ ) soccer teams voluntarily participated in the study. All participants had a minimum of six years of continuous soccer training and competitive experience and played in both national and local championships. Participants had at least three training sessions per week (~90 to 120 min per session), with an official soccer match (60 min per match) at the end of the week. All participants followed a similar training program consisting of technical and tactical skill development and physical conditioning under the supervision of the same qualified physical trainer. They were free from injuries limiting their ability to train and complete the performance tests. They were accustomed to the testing procedures and were asked to abstain from strenuous exercise for at least 24 h prior to the performance tests. The study was evaluated and approved by the local research ethics committee of the University of Turin (protocol n. 134685, approval date: 15 July 2016) and carried out in accordance with the most recent revision of the Declaration of Helsinki. All participants and their parents provided their written informed consent before the study began, after being informed about the experimental procedures, potential risks, and benefits of participation.

### Design and Procedures

A descriptive correlation design was used to explore the relationship among age, biological maturity status, and variables of soccer-related performance. A convenience sample of youth soccer players was recruited, and chronological age, relative age, and PDS-derived measures of puberal status (Petersen et al., 1988) were then determined. Players' anthropometric characteristics and physical capabilities using field tests for sprinting (10-m linear sprint test; Cronin and Templeton, 2008; Delaney et al., 2018), vertical jumps (countermovement jump test; Bosquet et al., 2009), repeated sprint ability ( $7 \times 34.2$ -m shuttle sprints with a slalom; Bangsbo, 1994), and intermittent high-intensity endurance (Yo-Yo intermittent recovery test level 1; Castagna et al., 2006; Krustup et al., 2003) were also determined. This battery of performance tests could describe the players' neuromuscular and endurance characteristics. Performance testing was carried out at the beginning of a training season to limit the differences in training status among participants. Each testing session, conducted within the same week,

spanned two days with an identical sequence. On the first day, players visited the medical room for anthropometric measurements and completed the PDS scale. They then followed a warm-up protocol (details below) and underwent anaerobic evaluations in this order: a countermovement jump, a 10-m linear sprint, and a repeated sprint ability test. To mitigate the effects of fatigue, participants received a 10 to 15-min recovery period after each test before the subsequent one. On the second day, after the same warm-up, players performed an intermittent high-intensity endurance test. All testing sessions were completed under comparable environmental conditions (temperature range: 18–22°C) and within a designated time frame (14:00–18:00), using an artificial turf that met the standards set for competitions at a national level (Stiles et al., 2009). Prior to all performance tests, participants completed a standardized warm-up, which included ten minutes of submaximal running and five minutes of athletic drills (such as skipping and high-knee runs), with three minutes of dynamic stretching in between. All participants had prior knowledge of the testing protocols due to their regular involvement in soccer club assessments.

## Measures

### Anthropometric Evaluation

All measurements were taken in the morning by the same trained evaluator. Body height was measured with a fixed stadiometer (model 702, Seca GmbH, Germany) and body mass with a digital scale (model 813, Seca GmbH, Germany), with precision of  $\pm 0.1$  kg and  $\pm 0.1$  cm, respectively.

### Pubertal Development

The PDS was used to measure pubertal development, as it is a valid and reliable self-assessment scale which significantly correlates with other measures of pubertal status, including physician ratings (Petersen et al., 1988). This scale comprises five questions about gonadal, adrenal, and growth factors that alter the body during puberty. For each question, participants were asked to rate changes in body height, body hair, facial hair, skin, and voice, using a 4-point scale (1 = has not begun yet, 2 = barely begun, 3 = definitely begun, 4 = seems complete). The PDS values were utilized to calculate the average PDS score (PDSavg5), the PDS category score (PDScat3), and the pubertal category. The PDSavg5 score was calculated by summing the responses of all five items, divided by the number of items. Otherwise, the PDScat3 score was calculated by

summing the body hair growth, voice change, and facial hair items. Finally, the pubertal category, obtained from the PDScat3 score, was used to categorize participants as early pubertal (score = 3, 4, or 5), mid-pubertal (score = 6 to 8), and late pubertal (score = 9 to 12) (Carskadon and Acebo, 1993). The Italian-translated version of the PDS (Perroni et al., 2014) was adopted in this study and used to relate soccer players' pubertal development and physical capabilities (Perroni et al., 2018). The questionnaire was completed individually in a conference room, with the silent presence of an investigator who helped when needed.

### Relative Age

Chronological age was defined as the number of days since birth. Relative age, on the other hand, was defined based on age quarters. Participants were assigned to one of four relative age quartiles based on their month of birth, regardless the year of birth. Specifically, Q1 referred to individuals born between January and March, Q2 to those born between April and June, Q3 referred to individuals born between July and September, and Q4 to those born from October to December. This categorization was chosen because the cutoff date for all sports in Italy, including soccer, is January 1<sup>st</sup>.

### Performance Evaluation

Countermovement jump test. Each participant performed a vertical jump test using an optical time system (model Optojump, Microgate, Bolzano, Italy). This system has been proposed to be valid for estimating jumping height by measuring flight time as traditional contact mats do (Bosquet et al., 2009; Castagna et al., 2013). Each participant was instructed to maintain an initial standing position with the plantar part of the foot contacting the ground and hands on the hips. Then, they performed a countermovement until the knee angle was  $\sim 90^\circ$  and immediately jumped as high as possible. All players performed three barefoot countermovement jumps (CMJ) interspersed with 2 min of rest in between. The highest jump with proper execution was used for the final data analysis. The CMJ is widely used as a valid and highly reliable (test-retest stability coefficient of 0,80–0,98) performance test to assess the explosive strength of the leg musculature of athletes (Bosco et al., 1983; Slinde et al., 2008). However, to account for the differences in body mass, CMJ data were converted into “work” by multiplying force (body mass  $\times$  acceleration of gravity)  $\times$  distance (jump height, in m).

Ten-meter linear sprint test. Linear sprint performance was evaluated using a valid and reliable 10-m standing start sprint test (Cronin and Templeton, 2008; Delaney et al., 2018). Two photoelectric cells (Polifemo, Microgate, Udine, Italy) placed 0,75 m above the ground and positioned 10 m apart with the first timing gate at 0.5 m from the start were used. All participants performed three linear sprint attempts, interspersed with 5-min rest intervals. The best 10-m sprint time was used for further analysis.

Yo-Yo intermittent recovery test. The Yo-Yo Intermittent Recovery Test level 1 (YYIRT1) was used to assess aerobic fitness. It is recognized as a valid indicator of physical performance related to soccer matches (Krustrup et al., 2003). Previous research has reported a substantial intraclass correlation coefficient of 0,78, further affirming its reliability (Fanchini et al., 2014). The YYIRT1 was performed according to the procedures suggested by Krustup et al. (2003) and Castagna et al. (2006). All participants performed 2 × 20-m sprints, back and forth, with their speed progressively increasing between starting and finishing lines, controlled by audible beeps. After each running bout, participants were allowed a 10-s rest interval to recover, during which they jogged around a cone placed 5 m behind the starting line. Participants experienced increasing increments of speed until they either failed twice to reach the line when the sound signal was given or were too tired to keep running at the required speed despite verbal encouragement. The measurement of the total distance covered was regarded as the outcome of the test (Krustrup et al., 2003).

Repeated sprint ability test. A Repeated Sprint Ability (RSA) test, consisting of seven 34,2 m shuttle sprints with a slalom on a turf surface, was performed to measure the ability to repeatedly produce maximal or near maximal short-duration sprints with brief recovery periods (Bangsbo, 1994). Each sprint was followed by 25 s of passive recovery, during which the participant jogged back to the starting line (Wragg et al., 2000). Verbal feedback was given at 5, 10, 15, and 20 s of the recovery period. Researchers instructed all participants to exert maximum effort during each sprint and avoid pacing themselves. Each sprint time was recorded to the nearest 0.01 s using a digital chronometer connected to photoelectric cells (S30-A, Digitech, Trieste, Italy) positioned at the starting and finishing lines. Both total time (RSATT), which is the sum of the seven 34,2-m shuttle sprints with a slalom, and a fatigue index (RSAFI), a measure of the performance decline demonstrated over the entire RSA test, were recorded and used for the final data analysis (Fitzsimons et al., 1993).

## Statistical Analysis

Descriptive statistics are reported as mean  $\pm$  standard deviation. The normality assumption was verified using the Shapiro-Wilk W-test. A one-way multivariate ANOVA was used to compare physical and performance variables among pubertal categories, followed by Tukey's post-hoc tests. A correlation matrix assessed correlations between PDS-derived measures of pubertal status (PDSavg5, PDScat3, and pubertal category). Correlation analyses were also performed to determine the relationship among chronological age, relative age, and PDS-derived measures of pubertal status with selected measures of physical performance (CMJ height, CMJ "work", 10-m linear sprint time, YYIRT1 covered distance, and RSATT and RSAFI). The correlation coefficient ( $r$ ) and the standard error of estimate (SEE) were reported as a result of each linear regression model. The level of significance was set at  $p < 0,05$ . All the analyses were conducted using SPSS Statistics 26.0 and RStudio.

## 2.3 Results

Sixty-one well-trained young male soccer players participated in the investigation. According to the positional roles, they were categorized as defenders ( $n = 25$ ), midfielders ( $n = 13$ ), strikers ( $n = 15$ ), and goalkeepers ( $n = 8$ ). Most participants were aged 13 ( $n = 25$ ; 41%) or 14 ( $n = 34$ ; 56%), with two players aged 12 and 15. Figure 2 illustrates the relationship between chronological age, expressed as the number of days since birth, and the PDSavg5. There was a large interindividual variability in pubertal status within the same age group in the studied population. In particular, participants were classified as early pubertal ( $n = 13$ ; 21%), mid-pubertal ( $n = 32$ ; 53%), and late pubertal ( $n = 16$ ; 26%). Table 1 shows the descriptive data of the selected measures of physical performance, grouped by PDS-derived indices of the pubertal category. Significant differences between pubertal categories were revealed for body height ( $F(2,58) = 12,6$ ;  $p < 0,001$ ), body mass ( $F(2,58) = 11,8$ ;  $p < 0,001$ ) and work in the CMJ test ( $F(2,58) = 6,0$ ;  $p < 0,001$ ), with early pubertal players showing lower measures in all variables.



Figura 2- Scatter-plot of the relationship between chronological age (years) and the average PDS score (PDSavg5). The 95% confidence area for each pubertal category is represented by a colored ellipse (i.e., early pubertal (green, n = 13); mid-pubertal (orange, n = 32), and late pubertal (blue, n = 16)).

	<b>Early pubertal (n = 13)</b>	<b>Mid pubertal (n = 32)</b>	<b>Late pubertal (n = 16)</b>
Age (years)	13.2 ± 0.4	13.7 ± 0.5	13.7 ± 0.6
Body height (cm)	160.8 ± 6.3	171.5 ± 6.0 <sup>a</sup>	170.6 ± 7.9 <sup>a</sup>
Body mass (kg)	48.8 ± 10.3	61.5 ± 7.9 <sup>a</sup>	63.0 ± 9.1 <sup>a</sup>
CMJ (cm)	29.6 ± 2.9	30.2 ± 4.9	29.5 ± 3.0
CMJ "Work" (J)	142.5 ± 40.4	182.2 ± 37.3 <sup>a</sup>	182.8 ± 32.1 <sup>a</sup>
10-m linear sprint (s)	1.86 ± 0.08	1.84 ± 0.09	1.82 ± 0.12
YYIRT1 (m)	1255 ± 382	1174 ± 382	1214 ± 396
RSA <sub>TT</sub> (s)	49.2 ± 1.6	49.7 ± 2.4	49.3 ± 2.4
RSA <sub>FI</sub> (%)	4.26 ± 1.70	4.13 ± 2.42	4.25 ± 2.17

Tabella 1 - Descriptive statistics (mean ± standard deviation) of the anthropometric indicators and selected measures of soccer performance, grouped by PDS-derived indices of the pubertal category.

CMJ, countermovement jump; CMJ “Work”, estimated work at the countermovement jump; YYIRT1, Yo-Yo intermittent recovery test level 1; RSA, repeated sprint ability; TT; total time; FI, fatigue index. <sup>a</sup> significant difference from “Early pubertal”,  $p < 0,05$

As expected, correlation coefficients between different PDS-derived measures of pubertal status, namely, PDS<sub>avg5</sub>, PDS<sub>cat3</sub>, and the pubertal category, were relatively high (range  $r = 0,84-0,91$ ;  $p < 0,05$ ). Such PDS indices, however, were scarcely related to selected measures of physical performance. Significant correlations were only found between different PDS-derived measures of pubertal status and “work” in the CMJ test (range  $r = 0,33-0,36$ ;  $p < 0,01$ ). Table 2 shows Pearson’s correlation coefficients between PDS-derived pubertal development indices and selected physical performance measures.

	PDS <sub>avg5</sub>		PDS <sub>cat3</sub>		Pubertal category	
	<i>r</i>	SEE	<i>r</i>	SEE	<i>r</i>	SEE
CMJ	-0.006	4.04	-0.013	4.04	-0.007	4.04
CMJ “Work”	0.366 †	36.95	0.351 †	37.18	0.336 †	37.39
10-m linear sprint	-0.215	0.09	-0.220	0.09	-0.153	0.09
YYIRT1	0.066	379.89	0.026	380.59	-0.031	380.54
RSA <sub>TT</sub>	-0.109	2.38	-0.115	2.37	0.018	2.39
RSA <sub>FI</sub>	0.028	2.20	-0.045	2.20	0.002	2.20

Tabella 2 - Correlation and standard error of the estimate (SEE) between PDS-derived indices of pubertal development and selected measures of physical performance.

Note. CMJ, countermovement jump; CMJ “Work”, estimated work at the countermovement jump; YYIRT1, Yo-Yo intermittent recovery test level 1; RSA, repeated sprint ability; TT; total time; FI, fatigue index. †  $p < 0.01$

Descriptive data of the selected measures of physical performance, grouped by chronological age and relative age (four quarters according to the player's birth month), are reported in Table 3. Pearson’s correlation coefficients between chronological age, relative age, and selected measures of physical performance are shown in Table 4. Similar to the PDS-derived measures of pubertal status, both chronological age and relative age were poorly related to selected measures of physical performance. A significant correlation was only found between chronological age and CMJ height ( $r = -0,297$ ;  $p = 0,02$ ) (Table 4).

	Q1	Q2	Q3	Q4
<b>Age group, 13-yrs</b>				
N (count)	11	2	8	4
Body height (cm)	163.7 ± 7.8	169.5 ± 0.7	167.6 ± 10.3	170.3 ± 8.2
Body mass (kg)	52.2 ± 11.3	58.2 ± 4.8	56.2 ± 12.7	61.5 ± 13.0
CMJ (cm)	30.2 ± 2.7	29.9 ± 1.7	31.3 ± 6.9	30.3 ± 4.8
CMJ "Work" (J)	155.4 ± 42.3	170.3 ± 4.4	174.3 ± 60.6	186.4 ± 60.2
10-m linear sprint (s)	1.85 ± 0.07	1.88 ± 0.04	1.83 ± 0.12	1.81 ± 0.15
YYIRT1 (m)	1396.4 ± 347.5	1500.0 ± 28.3	1382.5 ± 405.6	895.0 ± 318.9
RSA <sub>TT</sub> (s)	48.4 ± 2.2	48.1 ± 0.7	48.8 ± 2.8	50.4 ± 1.0
RSA <sub>FI</sub> (%)	3.33 ± 1.84	2.91 ± 1.05	4.81 ± 2.41	5.71 ± 1.39
<b>Age group, 14-yrs</b>				
N (count)	19	7	7	1
Body height (cm)	168.8 ± 5.4	175.4 ± 5.0	173.0 ± 9.9	170.0
Body mas (kg)	59.3 ± 7.9	68.4 ± 4.1	62.9 ± 10.9	63.9
CMJ (cm)	29.3 ± 4.4	29.3 ± 1.7	29.3 ± 2.5	25.4
CMJ "Work" (J)	171.1 ± 37.0	196.2 ± 12.0	179.9 ± 26.5	159.2
10-m linear sprint (s)	1.84 ± 0.09	1.83 ± 0.06	1.82 ± 0.14	1.96
YYIRT1 (m)	1059.8 ± 369.4	1104.2 ± 384.7	1177.5 ± 308.9	1321.4
RSA <sub>TT</sub> (s)	50.1 ± 2.4	50.2 ± 3.0	49.4 ± 2.4	49.9
RSA <sub>FI</sub> (%)	3.99 ± 2.74	4.07 ± 1.75	4.30 ± 1.68	4.97

*Tabella 3 - Descriptive statistics (mean ± standard deviation) of the anthropometric indicators and selected measures of physical performance, grouped by chronological age and relative age.*

*Q1–Q4, age quarter; CMJ, countermovement jump; CMJ "Work", estimated work at the countermovement jump; YYIRT1, Yo-Yo intermittent recovery test level 1; RSA, repeated sprint ability; TT, total time; FI, fatigue index*

	Chronological age		Relative age, 13-yrs		Relative age, 14-yrs	
	<i>r</i>	SEE	<i>r</i>	SEE	<i>r</i>	SEE
CMJ	-0.297 †	3.86	-0.002	3.04	0.194	4.44
CMJ "Work"	0.002	39.71	0.122	31.85	0.201	49.02
10-m linear sprint	-0.089	0.09	0.032	0.10	-0.130	0.09
YYIRT1	-0.242	369.45	-0.099	341.01	0.087	376.92
RSA <sub>TT</sub>	0.197	2.34	0.068	2.30	-0.069	2.39
RSA <sub>FI</sub>	-0.068	2.19	0.333	1.72	0.190	2.68

*Tabella 4 - Correlation and standard error of the estimate (SEE) between chronological age (days since birth), relative age (year's quartile), and selected measures of physical performance.*

*Note. CMJ, countermovement jump; CMJ "Work", estimated work at the countermovement jump; YYIRT1, Yo-Yo intermittent recovery test level 1; RSA, repeated sprint ability; TT; total time; FI, fatigue index. †  $p < 0,01$*

## 2.4 Discussion

To the best of the authors' knowledge, this study is the first to characterize the relationship among different PDS-derived measures of pubertal status, chronological age, relative age, and selected performance variables within a group of well-trained young soccer players that was narrowed in terms of age and training status. The principal novel finding of this investigation was that physical performance, except the vertical jump, of young soccer players seemed not to be related to chronological age, relative age, or different PDS-derived measures of pubertal status. This is somewhat surprising considering the reports indicating that differences in chronological age between the youngest and oldest individuals within an age group and/or advanced maturity status within the same cohort have been linked to advantages in body height, lean body mass, and performance (Figueiredo et al., 2009; Vaeyens et al., 2006). Significant correlations were only found between different PDS-derived measures of pubertal status and the variable "work" in the CMJ test and between chronological age and CMJ height. Such findings agree with prior reports on the potential impact of chronological age and/or biological

maturation on young soccer players' neuromuscular performance, particularly the vertical jump (Perroni et al., 2014; Radnor et al., 2021). It is worth noting, however, that there were more players born in the first quarter of the selection year than in any other quarter of the year. This over-representation of players born in the first part of the selection year has also been reported in other sports and is of paramount importance for the identification and development of talent.

Traditionally, youth soccer competitions have been organized into annual age groups (e.g., U10, U11, U12, etc.) in which athletes are divided into categories to ensure fair competition and equal opportunity. Consequently, there may be almost 12 months of difference between the youngest and the oldest athletes in the same cohort, where those who are born early in the selection year (e.g., first birth quarter) tend to have anthropometric and physical advantages compared with those born later in the selection year (e.g., fourth birth quarter) (Smith et al., 2018). This difference in chronological age between the youngest and oldest individuals within an age category is commonly referred to as relative age; the outcomes arising from this phenomenon are known as the relative age effect (Hill et al., 2020). The relative age effect is problematic because it leads to a skewed distribution of birth dates in many sports, with an over-representation of athletes who were born in the first half of the selection year (Helsen et al., 2000, 2005). Such over-representation suggests that traditional approaches to talent identification and development in soccer are mostly based on physical capabilities rather than technical or tactical skills (Chmura et al., 2022; Helsen et al., 2000). Nevertheless, our findings confirm the existing literature by showing that the proportion of players born in the first quarter of the selection year (50.8%) is much higher than the proportion of players born in all other quarters (49.2%). This skewed birthdate distribution towards an earlier birthdate from the age group cutoff date contrasts with the even distribution of birthdates in the Italian population. The potential causes and consequences of this overrepresentation have yet to be fully understood, though interest in this curious phenomenon has increased exponentially in recent years (Jakobsson et al., 2021).

The relative age effect has often been highlighted in soccer literature (e.g., Smith et al. (2018)), while few scientific reports have attempted to explore physical advantages purported for relatively older players (e.g., Carling et al., 2009). Surprisingly, our research findings did not support previous studies (Carling et al., 2009; Deprez et al., 2012; Hirose, 2009; Lovell et al., 2015) which indicate that soccer players who are born in the first quarter of the selection year tend to have greater body height and mass compared to those born in the fourth quarter, although

the small sample size makes our data hardly generalizable (Table 3). It has been previously reported that players born in the last quarter tend to mature earlier, offsetting the relative age effect and thus competing physically with their relatively older teammates (Deprez et al., 2012, 2013). Whether differences in body size, regardless of biological maturity status, might impact selected performance variables of young soccer players remains to be elucidated. Some findings, nevertheless, indicate that when considering players at the representative level, there is limited disparity in physical abilities between individuals born within the initial and final quarters of their respective age categories (Lovell et al., 2015). The present results confirm this observation and further indicate the absence of significant correlations between chronological age, relative age, and physical capabilities in young soccer players, despite the significant correlation between chronological age and CMJ height (Table 4). These findings confirm that the relative age effect on selected performance variables may not be easily identifiable in a relatively narrow group of young soccer players regarding chronological age and training status. The findings also suggest that coaches and talent scouts demonstrate a bias towards players who possess superior physical abilities, since individuals born in the fourth quarter of the selection year tend to mature earlier (Deprez et al., 2013); this enable them to better physically compete against their comparatively older peers. This hypothesis, however, could not be tested in the context of the present study and remains a topic for future investigations.

The general assumption is that biological maturation may influence the processes of identifying and developing young talents in soccer academies (Hill et al., 2020; Zanetti et al., 2021). Biological maturation is characterized by large interindividual variability rates and indicates that children within the same chronological age do not mature simultaneously, with some individuals maturing in advance or delayed relative to their peers (Jackowski et al., 2011). However, advanced maturity status within the same cohort is associated with advantages in body size, fat-free mass, and fitness components of importance for youth soccer performance (Figueiredo et al., 2009; Vaeyens et al., 2006). Interestingly, there is no evidence of overrepresentation of early maturing players in the studied sample (see Table 1; early pubertal, 21% vs. late pubertal, 26%). This finding is similar to a previous study (Grendstad et al., 2020) and indicates that players' physical capabilities, combined with other technical, tactical, and psychosocial attributes, and not biological maturity status per se, impact the processes of selecting young talents in soccer academies. This speculation is confirmed by our study since PDS-derived measures of pubertal status were scarcely related to selected measures of physical performance (Table 2). Hence, advanced maturity status per se is not always linked to

advantages in terms of physical and physiological characteristics in young soccer players. There were, however, significant relationships among chronological age, biological maturity status, and the vertical jump in the studied population (Table 2). The vertical jump was determined using a CMJ, a simple, valid, and reliable surrogate of the explosive strength of the leg musculature of athletes (Bosco et al., 1983; Slinde et al., 2008). CMJ test results, primarily adjusted by body mass, might indicate that older players or those advanced in maturity status outperform their younger or less mature counterparts (Tables 2 and 4) (Perroni et al., 2018). Whether vertical jumps are more susceptible than other physical capabilities for identifying variations in biological maturation within a relatively narrow sample of youth soccer players in terms of chronological age and training status is uncertain and warrants further investigation.

Some limitations of the present study should be mentioned. The most prominent limitation was the assessment of biological maturation (Baxter-Jones et al., 2005). Biological maturity status in youth athletes is determined using various methods, categorized into skeletal, sexual or somatic maturity indicators. Nevertheless, although these methods are deemed valid and reliable, they are constrained by factors such as the accessibility of equipment, necessity for proficiency in analysis techniques, time and cost implications, invasiveness of some measurements, as well as legal and ethical concerns (Lloyd et al., 2014). Alternative methods for estimating biological maturity status, such as self-reported puberty status, have been recently proposed and introduced in soccer studies, but their limitations in accuracy are still debated (Malina et al., 2012, 2019). The studied convenience sample size is relatively small within each group and narrowed in terms of age and the competitive level, as can be seen in Table 3. The small sample size, particularly in some quarters, makes descriptive statistics unreliable to those groups, and therefore, generalizing players from other chronological ages and competing at different levels should be made with caution.

## 2.5 Conclusions

These findings indicate that the potential effects of age and biological maturation on selected performance variables might not be easily identifiable in a group of young soccer players narrowed in terms of chronological age and training status. Biologically advanced soccer players, therefore, had no physical advantages and could equally compete physically with their

respective biologically delayed teammates. Whether such findings would be related to a selection phenomenon that started before the studied age (13–14 years), however, cannot be concluded and should be a topic of future studies.

### 3. Studio 2 – Chronological age, relative age, pubertal development, and their impact on countermovement jump performance in adolescent football players: An integrative analysis

#### 3.1 Introduction

Youth football is a popular sport: in Italy, more than 800,000 participants are engaged in the youth sector (Italian Football Federation, ReportCalcio, 2023). Football is characterized by an alternation of high- and low-intensity exercise periods and other intense actions (e.g., accelerations and decelerations, sprints, jumps, changes of directions, tackles, kicking, dribbling), and the high-intensity periods – despite representing just a small part (0.5–3.0 %) of the effective playing time – are determinant for the result of the game and have been reported as a distinguishing factor between top-class and lower level players (Bangsbo, 2014; Silva, 2022). Compared to adults, the physical performance required for youth football matches differs from youth to youth (Castagna et al., 2009; Castagna et al., 2010; Harley et al., 2010; Vaeyens et al., 2008). Youth athletic development is an individual process affected by interdependent factors in constant change (e.g., physical growth, biological maturation, behavioral development, environment) (Bergeron et al., 2015).

As in other sports, youth football competitions are arranged into annual age groups, for which 1st January is typically used as the cut-off date (Cobley et al., 2009; Muller et al., 2016; Musch & Grondin, 2001), which implies the observation of different development and maturity among youth athletes. Malina et al. (2004) highlighted the term “maturation” for changes in the body’s anatomy and functionality toward adult stature, and it can be defined in terms of status, tempo, and timing, which are highly individual. The transition period from childhood to adulthood includes changes in the nervous and endocrine systems and the corresponding anthropometric, physiological, and psychological changes (Costello et al., 2003; Negri & Susman, 2011; Sunnegardh et al., 1988; Perroni et al., 2020). Therefore, youths of the same chronological age can have differences in maturity status. Evidence showed that players born early in the selection

year take a physical advantage over their peers born later in the selection year (Mujika et al., 2009).

Several studies (Armstrong & Welsman, 2001; Beunen & Malina, 1988; Figueiredo et al., 2019; Figueiredo et al., 2009; Malina et al., 2004; Perroni et al., 2015) showed a relationship between biological maturity and advantages in anthropometric and physical fitness variables and a significant difference in categories, subcategories, and playing positions. In this way, Meylan et al. (2010) documented that biological maturity status is a predictor of player fitness, performance, and selection in youth football. Non-invasive and predictive methods are used to determine the maturational parameters, which can give coaches and practitioners useful information to administer the training load properly. In this way, Mirwald et al. (2002) proposed the estimation of the age of peak height velocity (PHV) as the age at which most athletes undergo their fastest rate of somatic growth; Figueiredo et al. (2019) talked of the 'Relative Age Effect' (RAE) as the difference between observed and expected birth date distributions of athletes, Perroni and colleagues (Perroni et al., 2020; Perroni et al., 2015; Perroni et al., 2014) used a self-administered rating scale for pubertal development (PDS) questionnaire to evaluate development and puberty status, and Cumming et al. (2017) proposed bio-banding, a strategy to group athletes relative to the attributes associated with growth or maturation.

While significant research has examined players' biological maturity, physical fitness, and performance, a gap exists in understanding which methods are most closely associated with specific football performance. For instance, a study conducted on thirty-eight 8-12-year-old soccer players in Qatar found a strong relationship between biological maturation (PHV) and jumping performance (Hermassi et al., 2024). Conversely, a recent study found that, despite the presence of a relative age effect and differences in pubertal development, no performance advantages in jumping ability were observed in a sample of 13- and 14-year-old football players, suggesting that the potential effects of age and biological maturation on selected performance variables may not be easily identifiable (Perroni, ..., & Corsi, L., 2024). Considering that jumping activities and their frequency are correlated with football performance, the aims of this study were: 1) to examine the relationship among countermovement jump (CMJ), category, chronological age, RAE, and pubertal development; 2) to assess which parameter could be better associated with CMJ in young male football players. To our knowledge, little is known about the relationship between the RAE, chronological age, biological maturation, and jumping performance in youth football players.

## 3.2 Materials and methods

### Participants

At the beginning of the Italian competitive football seasons from 2017–18 to 2021–22, in the last week before the first official match (i.e., September to October), we tested 259 Italian young male football players (66 strikers, 81 midfielders, 89 defenders, 23 goalkeepers), who voluntarily participated in the study. They were trained for at least three days and one training match per week for the previous month, and any strenuous activity or training outside of their regular training schedule was done. The sample was made up of players belonging to elite football academies from the “Giovanissimi” (under 14) to “Juniores” (under 19) age categories. A signed consent form was filled out by parents of all football players (<18 years old) before the first day of study and after a verbal and written explanation of the experimental design of the study approved by the Bioethics Committee of the University of Turin (Study Protocol No. 134685) following the ethical standards of the institutional and national research committee and with the 1964 Helsinki Declaration and its later amendments. In addition, the researcher informed subjects that they could withdraw from the study at any time.

### Procedures

The Football Clubs considered this evaluation a routine exam of their young football players and agreed to the participation of their players in the study. The same experienced investigator examined all subjects to reduce measurement variations, while experimental evaluations were performed in the gym to reduce the influence of weather conditions.

Once participants arrived at the training center, a Self-Administered Rating Scale for Pubertal Development (Carskadon & Acebo, 1993; Petersen et al., 1988) was completed in a quiet room to evaluate puberty. Then, each participant was taken to the medical room, where anthropometric measurements were collected. All the players were split into four birth quarters according to their month of birth (Q1: January–March; Q2: April–June; Q3: July–September; Q4: October–December), and then the RAE effect was defined as a higher relative sample size of the first quarter compared with the other birthdate quarters (Figueiredo et al., 2019).

Before jumping evaluations, the football players performed a standard 15-min warm-up consisting of jogging (40–60 % of individuals’ theoretical maximal heart rate, calculated as 220-age and monitored by heart rate devices), strolling locomotion, and 2–3 repetitions of self-administered submaximal jumps.

### Anthropometric evaluation

Using an electronic scale ( $\pm 0.1$  kg) and a stadiometer ( $\pm 0.1$  cm) (Seca 702, Seca GmbH & Co. KG, Hamburg, Germany), body mass and height were measured in light clothes and without shoes. The Body Mass Index (BMI) was calculated by dividing body mass by the squared height ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

### Pubertal development

A reliable and valid brief Self-Administered Rating Scale for Pubertal Development (Carskadon et al., 1993; Petersen et al., 1988), was used to measure the pubertal development score (PDS) and the Pubertal Status (PS). PDS was derived by summing the responses on a 4-point scale, ranging from 1 (without development) to 4 (development completed), about five different characteristics (body and facial hair growth, skin changes, deepening voice, and growth spurt) associated with pubertal maturation and then dividing by five. The PS was obtained by summing the reported values of body hair growth, facial hair growth, and voice change and classified into five categories: pre-pubertal (a combined score of 3), beginning pubertal (a combined score of 4 or 5), mid-pubertal (a combined score of 6–8), advanced pubertal (a combined score of 9–11), and post-pubertal (a combined score of 12). The internal consistency (Cronbach's  $\alpha$  coefficient of 0,89–0,93) and test-retest reliability (intraclass correlation coefficients 0,87) of the questionnaire were previously determined by Perroni et al. (2017) e Koopman-Verhoeff et al. (2020).

### Countermovement jump

To measure the maximal power of football players' lower extremities, the researcher asked the subjects to perform a countermovement jump (CMJ) test on an optical acquisition system (Optojump, Microgate, Udine, Italy) according to the protocol described by Bosco et al. (1983). The system has been previously reported to show high test-retest stability coefficients (range 0,80–0,98) (Slinde et al., 2008). From the standing position, subjects have to quickly bend their knees to a  $90^\circ$  angle and, immediately after, perform a maximal vertical thrust (stretch-shortening cycle), avoiding any knee or trunk countermovement. In addition, to avoid any arm-swing effect, subjects had to keep their hands on their hips during the jump. Subjects were instructed to keep the body vertical during the flight phase and land with their knees fully extended. The height of the jump was calculated in real-time by specific software linked to the

optical system, which was triggered by the feet of the subject at the instant of taking off and at contact upon landing ( $10^{-3}$  s of resolution). Three correct jumps were performed, and the highest was taken for statistical analysis. If football players failed to adhere to the rigorous protocol, the jump was repeated after an additional 1-min rest.

### Statistical analyses

Data are reported as absolute and relative frequencies or mean and standard deviation. For the analyses, U16 and U17 football categories were merged due to the low sample size in some year quarters. One-sample chi-square tests were used to test the uniformity of distributions of the proportions of players in each year quarter (Relative Age Effect) for the whole sample and stratified for each football age category (U14, U15, U17, and U19). One-way ANOVA models were then used to test the associations among a) players' role and CMJ performance (dependent variable), b) football categories, RAE, and CMJ performance (dependent variable), and c) the pubertal status category and CMJ performance (dependent variable). In order to allow comparison among birth quarters of different years (football categories include players born in different years), CMJ data were considered as difference from the mean of the first quarter of each year. Partial eta-squared ( $\eta^2_p$ ) was considered as the effect size measure. A correlation matrix (Pearson's  $r$ ) was computed to assess the relationship among anthropometric variables, chronological age, and pubertal development score. Pearson's  $r$  values were considered trivial ( $r < 0,10$ ), small ( $0,10 < r < 0,30$ ), moderate ( $0,30 < r < 0,50$ ), and large ( $r > 0,50$ ) (Cohen, 1988). A forward stepwise multiple linear regression model was used to explore the contribution of each predictor net of the others ( $p$  to enter  $\leq 0,05$ ;  $p$  to remove  $\geq 0,10$ ); the adjusted  $R^2$  was considered a measure of the variance explained by the independent variables. Statistical analyses were performed using the Statistical Package for Social Sciences (SPSS) software (ver. 29 version; IBM Inc., Chicago, IL, USA) at a standard significance level of  $\alpha = 0,05$ .

### 3.3 Results

The sample included 67 players from the U14 category, 76 from the U15, 63 from the U17 (U16 and U17 combined), and 53 from the U19. Based on the pubertal status, participants were classified as 5 pre-pubertal, 54 beginning pubertal, 109 mid-pubertal, 87 advanced pubertal, and 4 post-pubertal. Participants' characteristics grouped by football age category are reported in Table 5.

<b>Variable</b>	<b>U14</b>	<b>U15</b>	<b>U17</b>	<b>U19</b>	<b>Total</b>
Age (years)	13.1 ± 0.3	14.0 ± 0.2	15.4 ± 0.5	17.9 ± 0.8	14.9 ± 1.8
Height (cm)	160.5 ± 10.7	170.5 ± 6.9	172.9 ± 6.7	176.4 ± 6.4	169.7 ± 9.8
Body mass (kg)	51.1 ± 10.5	60.0 ± 8.7	62.8 ± 8.0	70.7 ± 8.9	60.6 ± 11.3
BMI (kg·m <sup>-2</sup> )	19.7 ± 2.9	20.6 ± 2.3	21.0 ± 1.9	22.7 ± 2.1	20.9 ± 2.6
PDS (a.u.)	2.1 ± 0.6	2.4 ± 0.5	2.7 ± 0.5	3.2 ± 0.5	2.5 ± 0.6

*Tabella 5 - Participants' characteristics, grouped by football age category (mean ± standard deviation).*

Table 6 presents the distribution of the players in the football age categories according to pubertal status (PS).

<b>Pubertal Status</b>	<b>U14</b>	<b>U15</b>	<b>U17</b>	<b>U19</b>	<b>Total</b>
Pre-pubertal	4 (6.0 %)	0 (0.0 %)	1 (1.6 %)	0 (0.0 %)	5 (1.9 %)
Beginning-pubertal	29 (43.3 %)	17 (22.4 %)	7 (11.1 %)	1 (1.9 %)	54 (20.8 %)
Mid-pubertal	26 (38.8 %)	37 (48.7 %)	33 (52.4 %)	13 (24.5 %)	109 (42.1 %)
Advanced-pubertal	8 (11.9 %)	22 (28.9 %)	22 (34.9 %)	35 (66.0 %)	87 (33.6 %)
Post-pubertal	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	4 (7.5 %)	4 (1.5 %)

*Tabella 6 - Distribution of the players according to the PS (n (column %)).*

When looking at the distribution of participants among year's quarters, regardless of birth year, they were distributed as follows: 106 players (40,9 %) were born in the first quarter of the year (January–March), 60 (23,2 %) in the second (April–June), 59 (22,8 %) in the third (July–September), and 34 (13,1 %) in the fourth (October–December). This distribution among year's quarter is significantly different from the expected proportion of 25 % of participants each quarter (one-sample chi-square test:  $\chi^2 = 41,74$ ;  $p < 0,001$ ), highlighting the presence of a relative age effect. Consequently, the same analysis was applied to each football age category to explore if this selection effect was present in all the categories. As a result, the relative age effect recurred in all categories except the U19, in which the distribution of players was not significantly different from the uniform distribution expected (Tabella 7)

Year's quarter	U14	U15	U17	U19	Total
January–March	25 (37.3 %) [16.8]	37 (48.7 %) [19]	29 (46.0 %) [15.8]	15 (28.3 %) [13.3]	106 (40.9 %) [64.8]
April–June	12 (17.9 %) [16.8]	17 (22.4 %) [19]	17 (27.0 %) [15.8]	14 (26.4 %) [13.3]	60 (23.2 %) [64.8]
July–September	20 (29.9 %) [16.8]	15 (19.7 %) [19]	9 (14.3 %) [15.8]	15 (28.3 %) [13.3]	59 (22.8 %) [64.8]
October–December	10 (14.9 %) [16.8]	7 (9.2 %) [19]	8 (12.7 %) [15.8]	9 (17.0 %) [13.3]	34 (13.1 %) [64.8]
<b>Chi-square</b>	8.76	25.68	17.95	1.87	41.74
<b>p-value</b>	0.033	<0.001	<0.001	0.600	<0.001

*Tabella 7 -Distribution of participants among year's quarters ( $n_{obs}$  (%) [ $n_{exp}$ ]).*

An exploratory one-way ANOVA was conducted to explore the effect of players' role on CMJ performance, but no significant differences were found ( $p > 0,05$ ). Then, two one-way ANOVA models were used to explore whether age, birth quarter, and pubertal status influenced the countermovement jump performance. In the first model, age and birth quarter were used as independent variables to explore whether a relative age effect existed on CMJ performance and if this could recur at all ages. Results indicate that age significantly influences CMJ performance (main effect,  $F_{(6,231)} = 8,85$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2_p = 0,187$ ), but the birth quarter did not (Tabella 8).

Category/Age	N	Jan–Mar	Apr–Jun	Jul–Sep	Oct–Dec	Total
U14	67	28.5 ± 5.1	25.9 ± 6.1	26.8 ± 7.7	22.2 ± 6.2	26.6 ± 6.5
13 years old	62	28.1 ± 5.5	25.9 ± 6.1	26.4 ± 7.7	22.2 ± 6.2	26.2 ± 6.7
U15	76	28.7 ± 4.6	28.9 ± 4.7	28.1 ± 4.4	29.5 ± 4.9	28.7 ± 4.5
14 years old	80	28.7 ± 4.4	28.9 ± 4.7	28.8 ± 3.8	29.5 ± 4.9	28.8 ± 4.3
U17	63	28.9 ± 5.5	29.6 ± 4.6	28.8 ± 6.4	30.5 ± 3.6	29.3 ± 5.1
15 years old	40	27.7 ± 5.5	27.8 ± 3.8	30.5 ± 6.3	31.7 ± 3.7	28.7 ± 5.2
16 years old	24	31.8 ± 4.3	31.3 ± 4.8	23.2 ± 2.8	28.4 ± 2.8	30.5 ± 4.7
U19	53	29.0 ± 4.8	35.0 ± 5.6	33.4 ± 5.3	36.1 ± 7.5	33.0 ± 6.1
17 years old	21	25.9 ± 4.3	36.0 ± 7.6	36.0 ± 5.7	37.9 ± 9.8	33.1 ± 8.2
18 years old	19	31.4 ± 3.5	35.6 ± 6.2	31.1 ± 5.3	34.1 ± 3.4	32.8 ± 4.9
19 years old	13	32.2 ± 4.3	34.1 ± 5.0	32.9 ± 1.7	32.5 ± 0.0	33.3 ± 3.8

*Tabella 8 - Countermovement jump performance (cm) grouped by soccer category, age, and year's quarter (mean ± standard deviation).*

Nevertheless, a significant interaction effect (age × birth quarter) was found, indicating that an effect of the birth quarter exists, but it is different among ages (interaction effect,  $F_{(18,231)} = 2,11$ ,  $p = 0,006$ ,  $\eta^2_p = 0,141$ ). This effect is graphically reported in Fig. 3 (the football age category was used instead of the raw age for better readability). It can be appreciated that the RAE effect is exclusively present in the U14 category, while no effect appears to be present in the other categories.

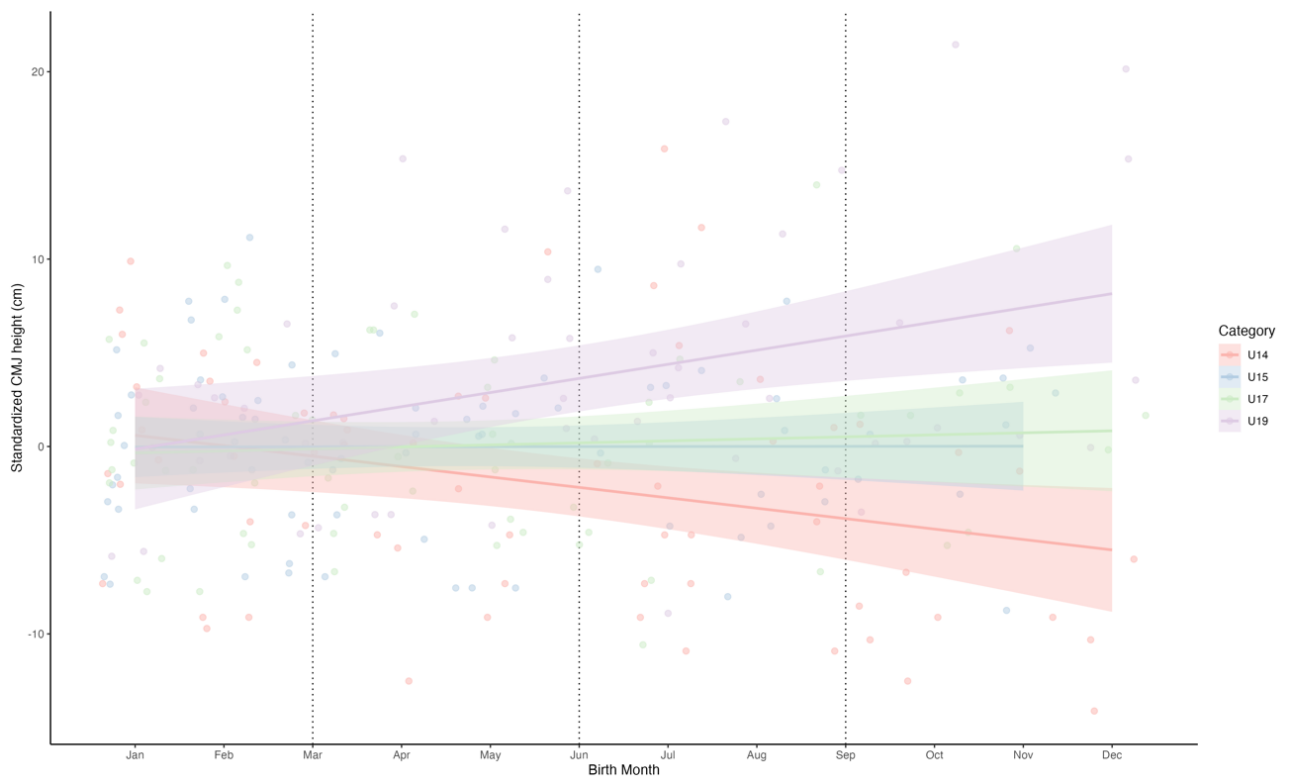
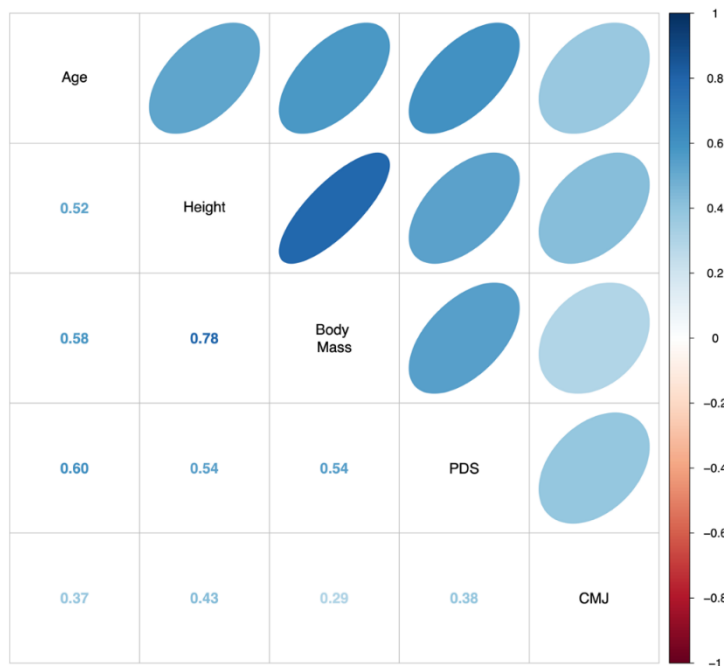


Figura 3 - Jitter plot of the Relative Age Effect on the different football age categories. On the x-axis, the birth month (vertical dotted lines divide the year's quarter) is reported, while on the y-axis, the CMJ height after standardization on the mean of the first quarter is reported to allow comparison between different birth years. The colors of the points and regression lines represent different categories.

In the second ANOVA model, pubertal status was used as an independent variable to explore whether pubertal development influenced CMJ performance. Results indicate a significant effect of pubertal development on CMJ (pre-pubertal:  $24,4 \pm 2,9$  cm; beginning-pubertal:  $26,4 \pm 5,6$  cm; mid-pubertal:  $28,7 \pm 5,8$  cm; advanced-pubertal:  $31,5 \pm 5,6$  cm; post-pubertal:  $35,4 \pm 2,0$  cm; main effect:  $F_{(4,254)} = 9,244$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta^2_p = 0,127$ ).

Finally, Pearson's correlations were computed to investigate the relationship between anthropometric variables, chronological age, pubertal development score, and CMJ jump performance (Fig. 4).



*Figura 4 -Correlation plot (Pearson's  $r$ ) among chronological age, anthropometric variables, pubertal development score (PDS), and countermovement jump (CMJ) performance.*

Age and physical growth (i.e., anthropometric measures and pubertal development) showed – as expected – high correlation values, ranging from  $r = 0,52$  and  $r = 0,78$  (large Cohen's effect size;  $p < 0,001$  for all). Consequently, a forward stepwise multiple linear regression was performed to explore the contribution of each predictor net of the others. All the predictive variables (chronological age, height, body mass, and PDS) entered into the model; the overall fit was statistically significant ( $F_{(4,254)} = 20,805$ ;  $p < 0,001$ ). The model explained 24.7 % of the variance in CMJ performance, with an adjusted  $R^2$  of 0,235. Age ( $t = 2,53$ ;  $\beta = 0,186$ ;  $p = 0,012$ ), height ( $t = 4,77$ ;  $\beta = 0,425$ ;  $p < 0,001$ ), and PDS ( $t = 2,42$ ;  $\beta = 0,175$ ;  $p = 0,016$ ) showed a positive association with CMJ performance, while body mass showed a negative association ( $t = -2,37$ ;  $\beta = -0,244$ ;  $p = 0,009$ ).

### 3.4 Discussion

This study aimed to explore the relationship between chronological age, relative (biological) age, pubertal development, and CMJ performance in young male football players in an attempt to understand which parameter would be better associated with jumping performance. The main

findings of our study are a) both chronological age and pubertal development have a significant impact on CMJ performance, b) a players' selection bias (RAE) exists, although the influence of birth quarter on performance is limited on the younger categories, c) anthropometric variables should be taken into account when analyzing jumping performances, as they explain a good portion of jumping variability.

It is well known that the range of variability between individuals of the same chronological age in somatic and biological growth is large, and it has been demonstrated that differences in growth and physical development between those born at the beginning and end of the year can lead to significant variations in performance (Iuliano-Burns et al., 2001; Roemmich & Rogol, 1995; Tanner, 1990). Perroni et al. (2014) have highlighted the importance of assessing the development and the pubertal status in youth football categories. Compared to that article, football players' PDS value in this study was slightly higher for U14 and U15 ( $2,3 \pm 0,6$  vs.  $1,9 \pm 0,5$ ) but similar for U17 ( $2,7 \pm 0,5$  vs.  $2,7 \pm 0,4$ ) and U17 and older ( $3,2 \pm 0,5$  vs.  $3,2 \pm 0,6$ ). When considering the distribution among the pubertal status categories, comparing them with those reported by Perroni et al. (2018), similar distributions were reported for Giovanissimi (U14 and U15) and Allievi (U17) categories, while in the Juniores (U19) category, a wider distribution across the pubertal categories was reported in this study; the players in Perroni and colleagues' study were mostly in the Advanced Pubertal (82 %) and Post Pubertal (18 %) categories.

The power (which heavily depends on maximal strength) of lower limbs has been previously indicated as a key parameter in football, as it allows players to maximally perform critical football skills such as sprinting, jumping, changing direction, or accelerating (Stolen et al., 2005; Wisloff et al., 2004). In the attempt to evaluate lower limbs' power, the countermovement jump test is frequently used in the literature, as it has been shown that jumping height is strongly associated with maximal strength (Wisloff et al., 2004) and power (Markovic et al., 2004). Several studies employed this test in the youth categories: for example, the CMJ values of our football players were lower than previously reported by Malina et al. (2004) in U14 elite Portuguese football players (26,6 vs. 29,3 cm, respectively) and Sporis et al. (2011) in 14–15 aged Croatian football players (28,8 vs. 45,47 cm, respectively).

Recent studies explored the associations between jumping performance and biological maturation. For example, Hermassi and colleagues (2024) recently reported a significant correlation between maturation (measured as PHV) and CMJ in a sample of 8 to 12-year-old soccer players. Perroni et al. (2014) showed a large ( $r = 0,63$ ) correlation between CMJ and

PDS in a sample of youth football players ( $13 \pm 3$  years). However, the same research group did not report a significant association between PDS and CMJ ( $r = 0,12$ ) in a sample of over one hundred players ( $13,5 \pm 1,4$  years) (Perroni et al., 2024), nor in another sample of sixty-one players ( $13,5 \pm 0,6$  years) (Perroni et al., 2024). Interestingly, in the latter paper, CMJ was not associated with PDS when “jump height” was considered as the outcome measure, but it moderately was ( $r = 0,37$ ) when CMJ “work” (product of force  $\times$  distance) was considered; this point suggests that anthropometric characteristics should be considered when analyzing jumping performance, as they could represent confounding factors in the analyses. This latter point is in agreement with the present study: indeed, a moderate correlation was reported between PDS and CMJ ( $r = 0,38$ ), partially replicating by Perroni et al. (2014) results, but when PDS was added in a multiple regression model along with other variables, it showed a standardized beta of 0,175, indicating that age, physical growth, and pubertal development are strictly related, so their contribution to performance should be considered net of the others. The concept that anthropometric variables should be considered when analyzing jumping performances – as they explain a good portion of jumping variability – is not really new. Indeed, some previous evidence reported that muscle power output increases with body size, and the maximal jump height could be a measure of muscle power output normalized for body size (Markovic et al., 2014). Although it has been suggested that performance of rapid movements (such as jumping height) could be relatively independent of body size in adults, muscle power is regulated by biological maturation as a function of sex hormones that rise with the progression of puberty, and as biological maturation advances, body mass increases, favoring the predominance of lean body mass and promoting the development of muscle strength (Hermassi et al., 2024). Accordingly, Jones et al. (2020) examined the effect of body size on CMJ kinetics in 7–11 years old children and concluded that body size must be accounted for to enable accurate conclusions to be drawn independent of growth, as body size significantly influenced the CMJ kinetics. This was also recently confirmed by other recent studies, which reported that different anthropometric characteristics in youth soccer players were key predictors of change of direction (Negra et al., 2023) and small-sided games performances (Costa et al., 2023).

The relative age effect (RAE) has been well-documented in football for the past two decades (Helsen et al., 2005; Mujika et al., 2009; Brustio et al., 2018; Rada et al., 2018), and it is considered the strongest predictor for player selection at the foundation level (Towlson et al., 2022). Several studies (Helsen et al., 2005; Gil et al., 2007) highlighted that athletes born earlier

in the year have an advantage over those born later in the same year when they encounter a similar task or exercise, and they have more opportunities to be selected by an elite soccer academy. As an example, practical advantages have been identified in the physical performances of youth football players born in Q1 (January–April) versus Q4 (September–December) (Deprez et al., 2013; Lovell et al., 2015). The overall RAE for all soccer players included in this study showed that players born at the beginning of the year (Q1) were consistently over-represented (Table 7), and it was in line with the RAE of players reported in several elite soccer leagues (Brustio et al., 2018; Doyle & Bottomley, 2019; Lupo et al., 2019; Gotze & Hoppe, 2020). Castillo et al. (2019) showed that in the U14 and U16 age categories, players born early in the year were over-represented compared to players born late in the year. However, birth distribution was not associated with the likelihood of a player being selected or promoted. Despite a common RAE, the proportions of players in each birth quarter might differ among studies and samples. For example, in our study, we had a lower proportion of players in Q1 and Q2 (and higher in Q3 and Q4) compared to the data reported by Gotze e Hoppe (2020) from the German male soccer team, but higher proportions in Q1 and Q2 (and lower in Q3 and Q4) compared to the U17 category in Figueiredo et al. (2021), which analyzed the Portuguese National team. Previous studies (Brustio et al., 2018; Brazo-Sayavera et al., 2018; Buekers et al., 2015; Mikulič et al., 2015) highlighted that the prevalence of RAE in sports gradually diminishes at older age categories, as confirmed by our results in which the RAE is no longer present in the U19 category, although other research reported that an RAE exists in over 44,000 Olympic athletes (Joyner et al., 2020).

When comparing the jumping performances between birth quartiles, the results obtained in this study are comparable with those of previous studies. For example, Deprez et al. (2013), which investigated the presence of RAE on anaerobic parameters in elite Belgian youth soccer players, reported that despite RAE being found in all categories (U13 to U17), the jumping performances were not different among birth quarters, in none of the categories. Similarly,, Fernández-Jávega et al. (2024) reported that RAE was present in a sample of U14 and U16 goalkeepers, but jumping performances were not affected by relative age, suggesting that biological maturation should be considered in the talent identification process. Pena-Gonzalez et al. (2021) explored the relative age-related differences between different competitive levels in young football players, reporting that although the proportion of players born in the first half of the year was higher than their counterparts born in the second half, jumping performances did not differ. In addition, Bezuglov et al. (2023) investigated the RAE on jumping, sprinting

and soccer-specific technical skills of over 670 young male soccer players in Russia, and although early-born players were more mature than late-born players, no statistically significant differences in any performance measure were found. Similarly, Toselli et al. (2022) explored the influence of relative age on physical performance in 162 young soccer players from the U12 to U15 age categories of elite and non-elite teams, reporting a significant effect of RAE on CMJ only in the U13 category. Coherently, in our study, we found that an RAE is present in all categories (except U19), but an effect of the birth quarter on CMJ height was found only in U14. The fact that an RAE exists although the influence of birth quarter on jumping performance is limited in the younger categories is particularly important because it shows that, although no performance RAE-related appears to be present after the U14 category, the selection of the players is 'biased' also in U15 and U17 categories. This might be explained by the fact that this selection bias in the younger categories ('justified' somehow by performance differences) is also maintained in the upper categories when performance differences are no longer present and might take years (up to the U19 category) to be corrected.

In conclusion, the novel findings of our study suggested that chronological age and pubertal development have a significant impact on CMJ performance, although anthropometric variables should be taken into account when analyzing jumping performances in the youth categories. Furthermore, a relative age effect exists, although the influence of birth quarters on performance is limited in the younger categories. Given that football performance is influenced by technical, physical, and physiological factors, many predictors of talent have to be considered by coaches and directors of football academies. Youth coaches, strength and conditioning coaches, and scouts should be aware of physical and biological maturation. A talent selection strategy centered only on physical performance parameters could lead to underestimating talented youth players who are competent in other performance factors. Furthermore, predicting future talent during adolescence is difficult because talent can change or disappear completely if not adequately developed (Simonton, 1999). Thus, football players may be physically underprepared to meet the demands of high training loads. Training to improve the physical qualities required by the intermittent nature of football (aerobic and anaerobic energy pathways, strength, speed, and flexibility) in youth football players is a complex and longitudinal process that has to take into account changes in training load administration in relation to the stage of development, and their potential windows of opportunity, of the young athlete. These results can help the Football Federations and youth football academies develop new football rules and appropriate training programs aimed at improving the adequate fitness, technical level, and

well-being of youth football players at different developmental stages. As suggested, players who are advanced in biological maturity are generally better performers than their late-maturing peers, and our findings suggest that training programs should be planned based on biological age to ensure an adequate progression of load to meet the physiological characteristics of the young players.

The implications of these findings extend beyond the jumping performance and the soccer context. Indeed, this methodological framework – which considers relative age, pubertal development and specific performance parameters – can be applied to other sports disciplines, genders, and categories. The practical ease of our approach, which used the birth date to assess RAE and a simple questionnaire to determine pubertal development, makes it a valuable reference for coaches and researchers aiming to replicate or reinterpret our findings in different contexts.

#### 4. Maturità puberale ed influenze sulla performance

La maturità biologica rappresenta un fattore determinante nello sviluppo delle capacità fisiche e delle prestazioni atletiche dei giovani calciatori. Nonostante le evidenti differenze legate alla maturazione in altezza, peso, forza, velocità e resistenza tra bambini della stessa età cronologica, l'età cronologica rimane spesso l'unico criterio di classificazione accettato negli sport giovanili. Questo approccio rischia di sottovalutare l'influenza della maturità, portando a una visione distorta delle capacità reali degli atleti. È quindi essenziale che gli studi prospettici sui giovani atleti considerino la maturità come un fattore critico nella classificazione e nella valutazione delle prestazioni sportive (Mirwald et al., 2002), in quanto la partecipazione a sport organizzati e competitivi spesso inizia già all'età di 6-7 anni.

A tal proposito, Armstrong et al. (2011) hanno recentemente riportato che i club di calcio della Premier League inglese, il Newcastle United e l'Aston Villa, avevano entrambi ragazzi di 6 anni che "avevano già gli occhi puntati sulla nazionale".

È pertanto essenziale che tutti gli studi sui bambini, sia nel contesto della classificazione degli sport giovanili che delle indagini di ricerca, tentino di controllare la maturità (Mirwald et al., 2002)

Durante l'adolescenza alcuni ragazzi hanno già vissuto diversi anni di allenamento intensivo e competizioni di alto livello. Le loro prestazioni sportive migliorano progressivamente ma in modo asincrono, in relazione all'età, alla crescita e alla maturazione (Armstrong et al., 2011).

Nello specifico, durante la pubertà, si verificano significativi cambiamenti morfologici e neurali, influenzando variabili chiave come la forza muscolare, la potenza, la velocità e la resistenza. Un'area in cui la maturità biologica esercita una forte influenza è lo sviluppo della forza muscolare (Cunha et al., 2019). La forza muscolare tende ad aumentare progressivamente dagli 8 ai 18 anni, con un picco di crescita che si verifica in risposta alla maturazione biologica (Cunha et al., 2019). Questo picco porta a un aumento significativo dell'altezza, della massa muscolare e ossea, e a cambiamenti nell'architettura muscolare, che si traducono in incrementi significativi della forza muscolare assoluta e del momento torcente (Cunha et al., 2019). Questi cambiamenti sono fondamentali per il miglioramento delle abilità specifiche del calcio, come i tiri, i salti, gli sprint, la difesa e i cambi di direzione (Cunha et al., 2019).

Peraltro, poiché i cambiamenti fisiologici legati alla maturazione (ad esempio, l'aumento ormonale, la mielinizzazione del sistema nervoso centrale) possono favorire diversi tipi di adattamento a seconda dello stato di maturità, la valutazione della forza, della potenza, della velocità e della relazione forza-velocità (F-v) potrebbe fornire una maggiore comprensione del modo in cui la maturità modifica gli effetti dell'allenamento di forza (Meylan et al., 2014).

Senza dimenticare che Armstrong et al. (2015) hanno anche indicato che la forma fisica potrebbe non essere sempre influenzata dalla maturazione biologica nei calciatori, suggerendo la necessità di una comprensione più approfondita degli effetti della maturazione sull'architettura muscolare, sulla forza muscolare, e sulle relazioni forza-lunghezza e forza-velocità.

La maturazione biologica non solo influisce sulle caratteristiche fisiche generali, ma ha anche un impatto diretto sulle prestazioni sportive specifiche (Goto et al., 2019). Ad esempio, è stato osservato che la maturità può influenzare le prestazioni di corsa durante una partita, un aspetto cruciale che determina l'efficacia in campo (Goto et al., 2019). Questi cambiamenti fanno sì che i ragazzi avanzati nello stato di maturità fisica siano spesso meglio rappresentati nelle squadre giovanili d'élite, rispetto ai loro coetanei meno maturi. Questo fenomeno mette in evidenza l'importanza di un processo di identificazione del talento che sia dinamico e specifico allo stadio di sviluppo biologico degli atleti (Murtagh et al., 2018).

Anche McQuilliam et al. (2006) hanno dichiarato che lo stato di maturazione è stato identificato come un fattore che contribuisce a una varietà di diversi indicatori di prestazione fisica, come la forza, la potenza di picco, lo sprint, la velocità di cambio di direzione (COD), così come le prestazioni anaerobiche e aerobiche. Per questo motivo è importante monitorare longitudinalmente la maturazione biologica.

La fase di crescita tra i 12 e i 16 anni è spesso considerata una "finestra di opportunità" ideale per migliorare le capacità fisiche, tecniche e fisiologiche degli atleti. Tuttavia, piuttosto che sviluppare nel tempo questa finestra di opportunità, il calcio tende a favorire sistematicamente i ragazzi che maturano prima, escludendo quelli con una maturazione più tardiva (Cunha et al., 2019).

Alcuni dati trasversali mostrano costantemente che dall'età di circa 13 anni, i ragazzi che sono avanzati nello stato di maturità fisica (maturità sessuale e scheletrica) sono meglio rappresentati nelle squadre giovanili d'élite di calcio (Murtagh et al., 2018). Questo approccio rischia di penalizzare atleti potenzialmente talentuosi che semplicemente si sviluppano a un ritmo più lento (Cunha et al., 2019). Un approccio multidisciplinare olistico è stato raccomandato per identificare giocatori di calcio talentuosi, con predittori di esperienza che includono fattori fisiologici, psicologici, sociologici, antropometrici e tecnici (Murtagh et al., 2018).

Dovrebbe essere appurato che la conoscenza del momento ottimale per applicare stimoli di allenamento durante lo sviluppo degli atleti è essenziale per una programmazione efficace e per migliorare le prestazioni atletiche.

Il processo di identificazione del talento per uno sport specifico deve essere dinamico e specifico allo stadio dello sviluppo biologico. (Murtagh et al., 2018).

Avere gli appropriati attributi fisici e fisiologici non è, ovviamente, l'unico fattore significativo per diventare un giovane atleta d'élite. La selezione iniziale e la permanenza nello sport d'élite avvengono all'interno di una matrice di caratteristiche bioculturali, che includono lo stato di salute, la dimensione della famiglia, il supporto dei genitori, lo status socio-economico e la prontezza psicologica (Armstrong et al., 2015). Peraltro, l'intero processo sportivo per l'atleta bambino d'élite dovrebbe essere piacevole e gratificante (Mountjoy et al., 2015.). Il Codice Medico del Movimento Olimpico (2009), sottolinea che tutte le parti interessate dovrebbero fare in modo che lo sport sia praticato senza pericolo per la salute degli atleti e nel rispetto del gioco leale e dell'etica sportiva. e dovrebbero prendere misure necessarie per proteggere la salute dei partecipanti e ridurre al minimo i rischi di lesioni fisiche e danni psicologici. La conoscenza di quando applicare uno stimolo di allenamento ottimale durante lo sviluppo degli atleti è essenziale per una programmazione efficace e per migliorare le prestazioni atletiche.

Questa comprensione ed approccio olistico è essenziale per ottimizzare i programmi di allenamento e garantire che gli atleti ricevano stimoli adeguati in base al loro stato di maturazione, affinché i programmi di allenamento possano svolgere un ruolo protettivo e rispettare la fase di sviluppo di ogni giovane atleta.

#### 4.1 Effetti della maturità puberale sul metabolismo energetico

Robinson fu il primo a pubblicare nel 1938 che le risposte fisiologiche alla camminata e alla corsa sul tapis roulant differivano tra bambini e adulti. In quel lavoro pionieristico, Robinson suggerì che un rapporto di scambio respiratorio (RER) inferiore durante l'esercizio negli adolescenti più giovani rispetto agli adolescenti più grandi e agli adulti fosse il risultato di una riserva ridotta di carboidrati. Tuttavia, credeva che il digiuno prolungato di 15 ore prima del test avesse causato una riduzione delle riserve di carboidrati endogeni nei giovani volontari e, quindi, un RER inferiore. I livelli di RER sono inferiori nei bambini rispetto agli adulti e che il RER aumenta con l'età negli adolescenti (Riddell,2008).

Convenzionalmente, il RER viene utilizzato per stimare l'utilizzo dei substrati. Tuttavia, il RER non è in grado di quantificare il contributo delle proteine, o di chiarire le varie fonti di lipidi (trigliceridi intramuscolari vs acidi grassi nel sangue) e carboidrati (CHO) (glicogeno muscolare vs glucosio nel sangue). È influenzato anche dall'esercizio precedente e dall'assunzione nutrizionale prima e durante l'esercizio. Nel confrontare i bambini con gli adulti, bisogna quindi considerare che i fattori di confondimento includono l'iperventilazione relativa dei bambini, la ridotta capacità di immagazzinamento del biossido di carbonio, la più rapida cinetica del consumo di ossigeno polmonare ( $pVO_2$ ), il raggiungimento più precoce dello stato stazionario di  $pVO_2$  durante l'esercizio a intensità moderata e il più piccolo componente lento di  $pVO_2$  (SC), che comporta un aumento del tempo dipendente di  $VO_2$  nell'esercizio, al di sopra del TLAC (Threshold of Lactate Accumulation). (Armstrong et al., 2015)

Uno studio di Montoye (1982) è particolarmente rilevante in questo contesto a causa del grande numero di bambini e adolescenti studiati (circa 180 esaminati nella fascia d'età 10-14 anni e circa 190 nella fascia d'età 15-19 anni). Il consenso generale è che il RER inferiore frequentemente osservato nei bambini, rispetto agli adulti, indica che i primi utilizzano significativamente più grassi e meno carboidrati per l'energia a una data intensità relativa di esercizio.

Ad esempio, durante il ciclismo al 70% del picco di  $VO_2$ , i ragazzi prepuberi e puberi precoci ossidano circa il 70% in più di grassi e circa il 23% in meno di carboidrati rispetto agli uomini. Il contributo relativo maggiore dei grassi negli adolescenti persiste anche quando l'esercizio viene eseguito durante l'assunzione di carboidrati (Riddell,2008).

Potrebbe essere che l'ossidazione più elevata dei grassi nei ragazzi sia un meccanismo predefinito a causa di un sistema di glicogenolisi e/o glicolitico non sviluppato, sebbene manchino prove sperimentali a supporto di questa ipotesi. (Riddell,2008)

Tassi elevati di ossidazione dei lipidi durante l'esercizio diminuiscono durante la maturazione e vi sono prove che lo sviluppo di un profilo di utilizzo dei carburanti adulti avvenga durante la transizione dalla pubertà media alla pubertà tardiva, almeno nei maschi. In aggiunta, l'utilizzo del CHOexo (carboidrati esogeni) come fonte di energia è risultato fortemente correlato allo stato puberale, con i tassi di ossidazione più elevati osservati nei ragazzi prepuberali e puberali precoci e i più bassi nei ragazzi puberali medi a tardivi, indipendentemente dall'età cronologica. (Armstrong et al., 2015)

Anche Armstrong et al. (2015) hanno supportato l'idea che la dipendenza dai carboidrati esogeni durante l'esercizio sia particolarmente sensibile allo stato puberale, con i tassi di ossidazione più elevati osservati nei ragazzi prepuberi e puberi precoci e più bassi nella pubertà medio-avanzata, indipendentemente dall'età cronologica.

Secondo quanto riportato da Paterson et al. (1986), già nel 1969 il Programma Biologico Internazionale raccomandava una valutazione longitudinale di specifici fattori fisiologici legati alla normale crescita e sviluppo dei bambini.

L'adolescenza è un periodo di rapida crescita causata da significativi cambiamenti nei livelli ormonali (Riddell,2008). Per molti, è anche un periodo di aumento dell'attività fisica e sportiva che richiede un grande impegno delle riserve energetiche. È noto che l'esercizio provoca perturbazioni nei sistemi endocrini e metabolici nei bambini e negli adolescenti (Riddell,2008). Peraltro, le prestazioni sportive di varia intensità e durata sono supportate da diversi sistemi energetici sovrapposti, e il contributo relativo di questi sistemi dipende dall'età e dalla maturazione (Armstrong et al., 2011). Per questo motivo comprendere la risposta metabolica all'esercizio può aiutare a formulare migliori raccomandazioni sull'attività fisica e sui nutrienti per i giovani di tutte le età (Riddell,2008).

Per quasi tutti i bambini, la partecipazione regolare all'attività fisica è salutare, favorendo lo sviluppo dei sistemi muscolari e scheletrici, migliorando la forma fisica cardiovascolare e la sensibilità all'insulina, riducendo al contempo la probabilità di obesità adolescenziale, dislipidemia e resistenza all'insulina. D'altro canto, un eccessivo allenamento durante l'adolescenza è associato a disfunzioni dell'asse ipotalamo-ipofisi che possono, ad esempio, ritardare il menarca, causare amenorrea e portare a immunosoppressione (Riddell,2008). La conoscenza delle specifiche risposte ormonali e metaboliche all'esercizio nei giovani è quindi

fondamentale per comprendere i benefici fisiologici e i potenziali rischi dell'attività fisica e della partecipazione sportiva (Riddell,2008).

#### 4.2 Effetti della maturità puberale sul metabolismo aerobico

Le raccomandazioni dell'ACSM suggeriscono che i giovani in età scolare dovrebbero partecipare quotidianamente ad almeno 60 minuti di attività fisica moderata o vigorosa che sia adeguata allo sviluppo e piacevole e che coinvolga una varietà di attività. (Faigenbaum et al., 2009)

La fitness aerobica può essere definita come la capacità di trasportare ossigeno ai muscoli e di utilizzarlo per generare energia attraverso il metabolismo aerobico per supportare l'attività muscolare durante l'esercizio dipende dai componenti polmonari, cardiovascolari ed ematologici del trasporto di ossigeno e dai meccanismi ossidativi del muscolo in esercizio (Armstrong et al., 2011).

Nei bambini, la risintesi aerobica dell'ATP si adatta relativamente lentamente alle richieste dell'esercizio fisico, con una costante di tempo di circa 20–25 secondi (Armstrong et al., 2011). La velocità di risintesi aerobica dell'ATP nei mitocondri è significativamente inferiore rispetto alla risintesi anaerobica, tuttavia, il metabolismo aerobico può utilizzare una varietà di substrati, tra cui carboidrati, lipidi (in particolare acidi grassi liberi, FFAs) e, in misura minore, aminoacidi, con il catabolismo proteico che contribuisce meno del 5% al fabbisogno energetico durante l'esercizio (Armstrong et al., 2011). Di conseguenza, il metabolismo aerobico ha una capacità molto più elevata di generare energia rispetto al metabolismo anaerobico (Armstrong et al., 2011). Sebbene il contributo aerobico alla risintesi dell'ATP sia limitato durante esercizi ad alta intensità di breve durata, esso aumenta progressivamente con il prolungarsi dell'esercizio (Armstrong et al., 2011). Nei bambini, il metabolismo aerobico diventa dominante durante attività che superano 1 minuto di durata (Armstrong et al., 2011).

In aggiunta, Eriksson et al. (1974) ha evidenziato un progressivo aumento delle riserve di glicogeno muscolare e della glicogenolisi con l'età, accompagnato da una maggiore produzione di lattato muscolare, indicando un crescente contributo glicolitico al metabolismo nei ragazzi man mano che maturano.

Il consumo massimo di ossigeno ( $\text{peak } \dot{V}O_2$ ), il tasso più elevato con cui un bambino o un adolescente può consumare ossigeno durante l'esercizio, è riconosciuto come il miglior singolo indicatore della fitness aerobica dei giovani. Il  $\text{peak } \dot{V}O_2$  limita la velocità di fornitura di

energia aerobica durante l'esercizio e un elevato peak  $\dot{V}O_2$  è un prerequisito per la performance d'élite. (Armstrong et al., 2011).

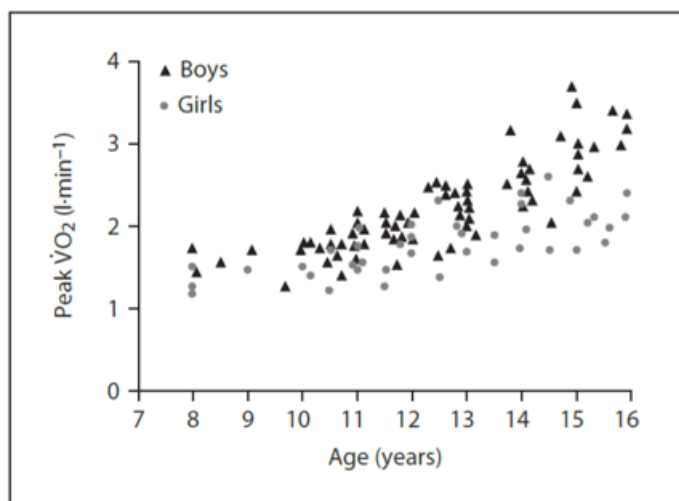


Figura 5-Relazione tra Peak  $\dot{V}O_2$  ed età, Armstrong et al. (2011)

La figura 5 illustra chiaramente un aumento quasi lineare del picco di  $\dot{V}O_2$  nei ragazzi in relazione all'età. Nello specifico, il picco di  $\dot{V}O_2$  dei ragazzi (litri  $\cdot$  min<sup>-1</sup>) aumenta di circa il 150% dagli 8 ai 16 anni.

Tuttavia, il picco di  $\dot{V}O_2$  non rappresenta in modo esaustivo tutti gli aspetti della fitness aerobica specifica per lo sport. Non costituisce né la misura più indicativa della capacità di un bambino di sostenere esercizi aerobici submassimali, né il parametro più sensibile per rilevare miglioramenti nella fitness aerobica a seguito di un programma di allenamento. Sebbene sia associato principalmente al metabolismo anaerobico muscolare, l'accumulo di lattato nel sangue rappresenta un indicatore rilevante della fitness aerobica e può essere utilizzato per monitorare i miglioramenti della capacità ossidativa muscolare, anche in assenza di variazioni nel picco di  $\dot{V}O_2$ . (Armstrong et al., 2011).

Armstrong et al. (2011) ha evidenziato che i maggiori incrementi del picco di  $\dot{V}O_2$  si verificano tra i 13 ed i 15 anni. È stato ipotizzato che l'aumento più significativo del picco di  $\dot{V}O_2$  coincida con il raggiungimento del picco di velocità di crescita in altezza (PHV). Tuttavia, diversi studi hanno riportato un incremento costante del picco di  $\dot{V}O_2$  tra i tre anni precedenti ed i due anni successivi al PHV. Inoltre, il picco di  $\dot{V}O_2$  risulta fortemente correlato alla dimensione corporea, con coefficienti di correlazione superiori a 0,70 sia per la statura che per la massa corporea. Quando lo stadio di maturazione (sviluppo dei peli pubici) è stato incluso nei modelli

statistici, sono emersi effetti positivi incrementali dello stadio di maturazione sul picco di  $\dot{V}O_2$ , indipendenti sia dall'età che dalla dimensione corporea.

Inoltre, i requisiti per il successo nello sport dipendono tanto dalla capacità di cambiare rapidamente l'intensità dell'esercizio quanto dalla capacità di raggiungere o mantenere una performance aerobica massimale per periodi prolungati. In queste circostanze sono le cinetiche transitorie del  $\dot{V}O_2$  a riflettere la risposta integrata del sistema di consegna dell'ossigeno e dei requisiti metabolici del muscolo in esercizio.

A tal proposito, durante una transizione graduale nell'esercizio, si osserva un aumento immediato del  $\dot{V}O_2$  (fase I), associata a un aumento della gittata cardiaca. Questa fase, della durata di circa 15 secondi nei bambini, è seguita da un incremento esponenziale del  $\dot{V}O_2$  (fase II), correlato all'arrivo ai polmoni del sangue ipossico e ipercapnico proveniente dai muscoli in esercizio. La cinetica della fase II, descritta dalla costante di tempo necessaria per raggiungere il 63% del cambiamento nel  $\dot{V}O_2$ , riflette la capacità muscolare di utilizzare ossigeno. Nei bambini, la fase II è più rapida rispetto agli adulti, con una maggiore efficienza nella fosforilazione ossidativa, che porta a un deficit di ossigeno inferiore. (Armstrong et al., 2011) Sempre Armstrong et al. (2015) afferma che, nei giovani, la minore ampiezza della componente lenta (SC, slow component) della cinetica del  $p\dot{V}O_2$ , che rappresenta un aumento progressivo e ritardato del consumo di ossigeno durante esercizi prolungati ad alta intensità, è associata a una maggiore resistenza alla fatica. A confermare il fatto di come i giovani abbiano un potenziale maggiore per il metabolismo ossidativo rispetto agli adulti all'inizio dell'esercizio. Per quanto riguarda la capacità di recupero, i giovani sono stati spesso descritti come in grado di recuperare più rapidamente. Tuttavia, analizzare il tasso relativo di affaticamento e recupero dei bambini e degli adulti è complesso poiché le loro prestazioni massime a breve termine o la potenza non sono comparabili. Peraltro, si potrebbe sostenere che poiché i bambini generano una potenza inferiore, il loro recupero più rapido dall'esercizio ad alta intensità non è direttamente comparabile agli adulti perché hanno meno da recuperare.

Tuttavia, il consenso di numerose indagini nei maschi è che la capacità di recuperare da sessioni di esercizio ad alta intensità subisce un graduale declino dall'infanzia all'età adulta. Questa resistenza alla fatica è stata attribuita al fatto che i giovani hanno una capacità ossidativa potenziata, cinetiche di recupero più rapide delle variabili cardiorespiratorie, ri-sintesi più rapida del PCr, reclutamento e utilizzo differenziale delle unità motorie, migliore regolazione dell'equilibrio acido-base e produzione inferiore e/o rimozione più efficiente dei sottoprodotti metabolici rispetto agli adulti. (Armstrong et al., 2015)

Per concludere, Danis et al. (2003) afferma che l'allenamento durante la crescita puberale può favorire la potenza aerobica (a seconda della composizione corporea) e la capacità aerobica, ma non ha effetto sul VO<sub>2</sub>max assoluto. Il controllo genetico sembra avere un forte impatto sull'entità degli adattamenti, con l'interazione tra genotipo e allenamento che spiega una parte piccola ma significativa di essi.

#### 4.3 Effetti della maturità puberale sul metabolismo anaerobico

La capacità di allenamento del sistema anaerobico nei giovani ha ricevuto meno attenzione rispetto alla forza e/o alla forma fisica aerobica. Tuttavia, la capacità anaerobica e la potenza anaerobica possono influenzare le prestazioni sportive e, quindi, l'interesse per l'allenabilità di queste caratteristiche è rilevante per allenatori, atleti e scienziati dello sport (Matos et al., 2017). Secondo Tanner (1962), la risposta di un bambino all'esercizio fisico è meglio compresa quando aggiustata per l'età di PHV, poiché i cambiamenti fisiologici si riferiscono più al picco di crescita che all'età cronologica. Peraltro, come suggerito da Bar-Or (1984), la capacità anaerobica dipende dalle caratteristiche qualitative del muscolo e correlata ai cambiamenti associati alla maturazione.

L'allenabilità anaerobica dei giovani è difficile da studiare, data la moltitudine di fattori legati alla performance e alla capacità per attività a breve termine e di massima intensità. Una delle ragioni per questa scarsità di dati è che le attrezzature e i protocolli per studiare la prestazione anaerobica sono piuttosto complessi rispetto a quelli utilizzati per i programmi di forza; questi ultimi richiedono solo la misurazione della forza, mentre i primi richiedono la misurazione simultanea della produzione di forza nel tempo (Blimkie e Bar-Or, 1996). Inoltre, fattori etici hanno limitato la nostra capacità di quantificare i cambiamenti nell'attività glicolitica muscolare a livello cellulare nei bambini. A complicare ulteriormente la situazione, la produzione di potenza durante test come il Wingate o il test Forza-Velocità è una combinazione non solo del tasso di attività glicolitica, ma anche di altri fattori come la dimensione muscolare e l'attività neurale. Inoltre, quando si valuta l'allenabilità della velocità e altre attività a breve termine come il salto in alto o il salto con contromovimento, devono essere considerati anche la plasticità della coordinazione neuromuscolare e delle abilità motorie (Blimkie e Bar-Or, 1996; Rowland, 2005).

Il lattato viene costantemente prodotto nel muscolo scheletrico, anche a riposo. Tuttavia, con l'inizio dell'esercizio, l'aumento della risintesi glicolitica dell'ATP porta a una maggiore

produzione di lattato nelle fibre muscolari attive (Armstrong,2011). Il lattato si accumula nel muscolo e diffonde nel sangue, dove, può essere misurato per stimare la fitness aerobica. L'accumulo di lattato nel sangue, però, dipende da diversi processi dinamici, tra cui la produzione e il consumo muscolare di lattato, la diffusione nel sangue e il tasso di rimozione dal circolo sanguigno (Armstrong,2011).

È stato dimostrato (Armstrong,2011) che l'allenamento sposta la curva del lattato dei giovani verso destra (cioè, meno accumulo di lattato nel sangue post-allenamento alla stessa intensità di esercizio pre-allenamento o  $\dot{V}O_2$ ). Monitorare l'accumulo di lattato nel sangue fornisce quindi un mezzo sensibile per rilevare aumenti della fitness aerobica a seguito dell'allenamento in assenza di cambiamenti significativi nel peak  $\dot{V}O_2$ . Durante un test di esercizio progressivo incrementale, il lattato si accumula nel sangue come illustrato nella figura 6.

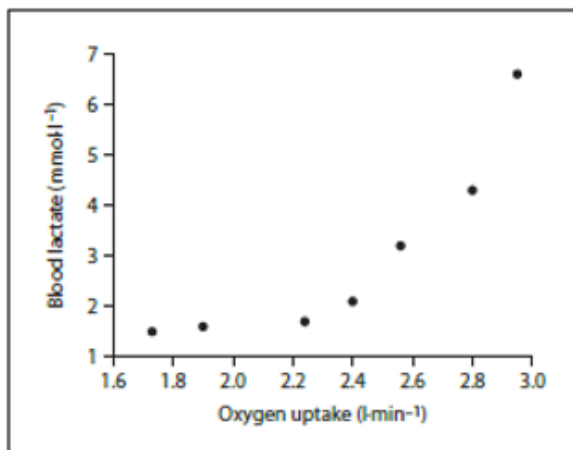


Figura 6 - Risposta del lattato ematico all'esercizio in relazione al picco di consumo di ossigeno -Armstrong et al. (2011)

Tendenzialmente, i miglioramenti nella fitness aerobica indotti dall'allenamento risultano in un minore accumulo di lattato nel sangue a tutti i livelli di esercizio sub-massimale (Armstrong,2011); quindi, qualsiasi punto sulla curva del lattato potrebbe essere utilizzato per rilevare e monitorare i miglioramenti intra-individuali. Tuttavia, per effettuare confronti tra individui o gruppi, i valori di riferimento come il Threshold of Lactate Accumulation (TLAC) ovvero il primo aumento osservabile di lattato sopra i livelli a riposo durante l'esercizio incrementale sono convenzionalmente riportati e monitorati. Sia il TLAC che il Maximal lactate steady state, (MLSS) ovvero l'intensità di esercizio più alta che può essere sostenuta senza incorrere in un accumulo progressivo di lattato nel sangue, possono fornire indicatori sensibili

della fitness aerobica e marcatori preziosi della transizione da un esercizio moderato a pesante e da pesante a molto pesante, rispettivamente.

Il TLAC in relazione al picco  $\dot{V}O_2$  è ben consolidato come misura della fitness aerobica dei ragazzi (Armstrong,2011), ma il MLSS non è stato documentato ampiamente nei giovani. Valori di riferimento fissi per l'accumulo di lattato, come  $4 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ , sono stati proposti come riflettenti il MLSS e raccomandati per l'uso negli adulti, ma non sono applicabili ai bambini dove studi, utilizzando una pletera di metodologie, hanno riportato valori medi di MLSS che variano da 2,1 a  $5,0 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ . TLAC e MLSS sono utilizzati regolarmente per monitorare i programmi di allenamento ma per essere strumenti efficaci devono essere determinati e interpretati individualmente poiché esistono ampie variazioni interindividuali, particolarmente nei giovani atleti (Armstrong,2011).

Secondo Armstrong et al. (2011), i bambini accumulano meno lattato nel sangue degli adulti sia durante l'esercizio sub-massimale che massimale e c'è una correlazione negativa tra il TLAC come percentuale del picco  $\dot{V}O_2$  e l'età ovvero man mano che l'età aumenta, il TLAC tende a verificarsi a una percentuale più bassa del  $\dot{V}O_2 \text{ max}$ .

Eriksson et al. (1974) hanno suggerito che la maturazione sessuale potesse giocare un ruolo importante nello sviluppo dei percorsi glicolitici e nella produzione di lattato, basandosi su una correlazione tra il lattato muscolare e i volumi testicolari in ragazzi di 12 e 13 anni.

Nel 1986, Paterson et al. hanno descritto nei ragazzi prepuberi una capacità anaerobica (AnC) inferiore rispetto agli adulti di 21 anni, attribuendo ciò a una ridotta attività del sistema glicolitico, in particolare a un'attività inferiore della fosfofruttochinasi nei bambini e negli adolescenti. I dati sull'ossigeno di recupero (ml/kg) mostrano che, sebbene questo sistema possa maturare tra i 10 e i 15 anni ( $56-80 \text{ ml/kg}$ ), nella maggior parte dei casi non raggiunge il potenziale osservato negli adulti ( $102 \text{ ml/kg}$ ).

Le evidenze riportate da Paterson (1986) indicano che lo sviluppo della capacità aerobica e anaerobica nei giovani atleti è fortemente influenzato dalla crescita e dalla maturazione, ma segue dinamiche differenti rispetto agli adulti. Il  $\dot{V}O_2 \text{ max}$  aumenta significativamente con l'età sia in termini assoluti (volume totale di ossigeno consumato), con un incremento del 94%, sia in termini relativi (rispetto al peso corporeo), con un aumento del 12%. Gli incrementi più grandi si sono verificati nel periodo compreso tra un anno prima e un anno dopo il PHV. Tuttavia, la capacità anaerobica, misurata attraverso l'ossigeno di recupero e i livelli di lattato nel sangue, mostra miglioramenti costanti durante la crescita, ma rimane inferiore rispetto agli adulti anche all'età di 15 anni.

Questi risultati suggeriscono che, nonostante i miglioramenti osservati con l'età, la maturazione completa del sistema glicolitico e della capacità anaerobica nei giovani non è ancora raggiunta rispetto agli adulti, probabilmente a causa di una minore concentrazione e attività degli enzimi glicolitici, come la fosfofruttochinasi (PFK). Inoltre, la ridotta capacità tampone nei bambini può contribuire ad un accumulo inferiore di lattato, nonostante un livello di acidosi inferiore rispetto agli adulti. (Paterson et al., 1986)

Una metodica diretta utilizzata per avere informazioni sul metabolismo cellulare è la spettroscopia di risonanza magnetica (MRS). Questa metodica può essere impegnativa da effettuare con i partecipanti giovani ma Barker et al. (2010) hanno dimostrato una buona affidabilità test-retest con bambini pre-puberi. Nello specifico, le soglie intracellulari (IT) per il rapporto muscolare tra fosfato inorganico ( $P_i$ ) e fosfocreatina (PCr) ovvero  $IT_{P_i/PCr}$  e il pH muscolare ovvero  $IT_{pH}$  sono indicatori in vivo preziosi della capacità ossidativa del muscolo e si è dimostrato che si verificano nei bambini a output di potenza relativi simili alla soglia lattacida o alla soglia ventilatoria.

Durante l'esercizio ad alta intensità (cioè, sopra  $IT_{P_i/PCr}$  e  $IT_{pH}$ ) sono state evidenti differenze legate all'età nelle risposte di fosfato muscolare e pH, con gli uomini che mostravano un maggiore contributo anaerobico al metabolismo dell'esercizio rispetto ai ragazzi.

Durante l'esercizio a bassa e moderata intensità il metabolismo ossidativo non è legato all'età, ma, durante l'esercizio sopra l' $IT_{P_i/PCr}$ , i ragazzi sono caratterizzati da un minore aumento di  $P_i/PCr$  per un dato aumento dell'output di potenza rispetto agli uomini. La caduta del pH per un dato aumento dell'output di potenza seguendo l' $IT_{pH}$  è inferiore nei ragazzi rispetto agli uomini. In sintesi, i risultati dello studio di Barker et al. (2010) evidenziano che la performance sia negli esercizi a massima intensità di breve durata sia negli esercizi incrementali ad alta intensità fino all'esaurimento tende a migliorare con l'avanzare dell'età, la crescita e la maturazione.

Tuttavia, contrariamente a quanto sostenuto precedentemente, lo studio di Angius et al. (2012) ha evidenziato che la capacità anaerobica nei giovani calciatori sembra essere già pienamente sviluppata. La ricerca ha coinvolto 37 atleti maschi di una squadra di Serie A italiana, suddivisi in due gruppi: un gruppo di adulti (AD,  $n = 20$ ) con età superiore ai 19 anni, e un gruppo di giovani (YO,  $n = 17$ ) di età compresa tra 16 e 18 anni. I risultati non hanno mostrato differenze significative tra i due gruppi nei principali indicatori di capacità anaerobica, come il tempo di esaurimento (TE), il picco di lattato nel sangue (BL<sub>peak</sub>), il prodotto  $TE \times BL_{peak}$ , e l'eccesso di anidride carbonica prodotta ( $CO_2$ excess), suggerendo che i giovani atleti abbiano già sviluppato pienamente la capacità anaerobica (Figura 7).

Tuttavia, il gruppo di adulti ha mostrato valori significativamente più alti di  $VO_{2max}$ , sia assoluti che relativi, rispetto ai giovani:  $55,23 \pm 4,65$  mL/min/kg negli adulti contro  $51,48 \pm 4,73$  mL/min/kg nei giovani. Inoltre, gli adulti hanno registrato una velocità massima ( $V_{max}$ ) e una velocità alla soglia anaerobica (VAT) superiori, evidenziando una maggiore capacità aerobica rispetto ai calciatori più giovani.

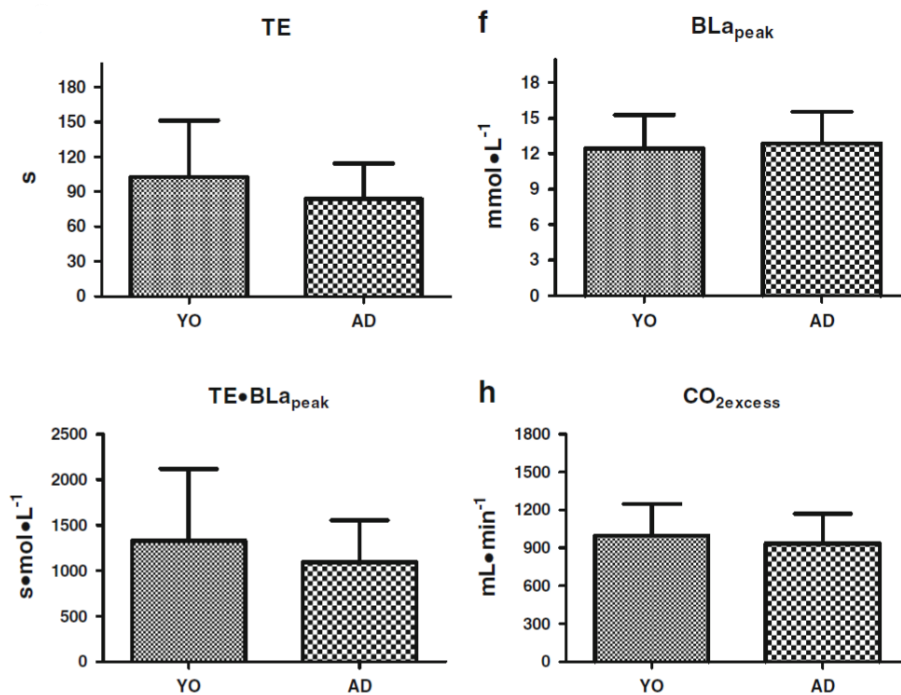


Figura 7 -Valori massimi di consumo di tempo all'esaurimento (TE), picco di lattato nel sangue (Blapeak), indice di capacità anaerobica (TE × Blapeak) e eccesso di produzione di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>excess) durante il test sopra-massimale nei gruppi dei giovani

È fondamentale considerare ogni giovane atleta come un individuo unico, evitando di generalizzare le valutazioni, specialmente durante la fase di sviluppo. Le variazioni nella crescita e maturazione biologica richiedono che ogni prestazione sia contestualizzata e analizzata con attenzione, tenendo conto dei fattori individuali che influenzano la performance. Sebbene un giovane possa raggiungere livelli di performance simili a quelli di un atleta adulto in determinate capacità, queste vanno esaminate nel loro specifico contesto di maturazione fisiologica. Generalizzare i risultati tra gruppi o fasce d'età senza un'adeguata valutazione individuale potrebbe portare a conclusioni errate e inadeguate per l'ottimizzazione del percorso di sviluppo atletico.

A sostegno di questa individualità, la ricerca scientifica evidenzia come i marcatori biologici e ormonali, in particolare il testosterone, svolgano un ruolo cruciale nello sviluppo delle capacità neuromuscolari. Almeida et al. (2020) hanno esaminato la relazione tra maturazione biologica, livelli di testosterone e prestazioni neuromuscolari nei giovani atleti maschi. I risultati indicano che il testosterone è significativamente correlato alle prestazioni neuromuscolari e alla composizione corporea, con una capacità predittiva del 49,5% per la massa magra e del 49% per la forza degli arti superiori. Gli atleti con livelli di testosterone superiori a 100 ng/dL hanno mostrato migliori prestazioni nella forza degli arti superiori, nel salto da fermo (SJ), una percentuale di grasso inferiore e una maggiore massa magra rispetto ai coetanei con livelli più bassi. La maturazione biologica è risultata predittiva di massa magra, forza muscolare e velocità con cambi di direzione, ma non sono emerse correlazioni significative tra i marcatori di maturità biologica e ormonali. Gli autori concludono che livelli più elevati di testosterone sono associati a una maggiore forza muscolare e a una minore adiposità, confermando il ruolo cruciale di questo ormone nello sviluppo muscolare durante la pubertà.

Per quanto riguarda la performance negli esercizi di massima intensità, Armstrong et al. (2011) hanno affermato che migliora con l'età. Come illustrato nella figura 8, la potenza di picco nel ciclismo (CPP), misurata attraverso il test di Wingate, presenta un incremento lineare dai 7 fino ai 13 anni. Successivamente, si osserva un ulteriore e più accentuato aumento lineare della CPP, che prosegue fino all'età adulta.

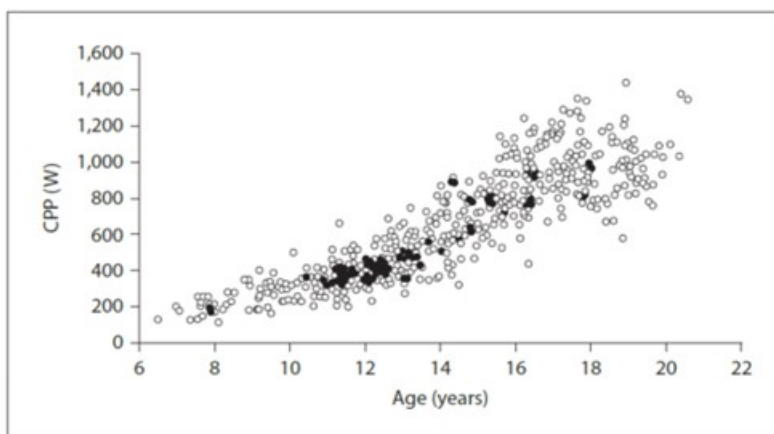


Figura 8 - Relazione tra la potenza massima nel ciclismo e l'età, Armstrong et al. (2011)

Secondo Nikolaïdis (2011), la potenza di picco nel test Wingate è considerata un descrittore della potenza a breve termine che si basa principalmente sul sistema anaerobico lattacido (adenosina trifosfato-creatina fosfato), mentre la potenza media è un descrittore della capacità

di resistenza muscolare locale che si basa principalmente sulla glicolisi anaerobica con produzione di lattato (sistema anaerobico lattacido). Nei suoi studi sui calciatori dall'U14 all'U21, Nikolaïdis (2011) ha sottolineato come la potenza di picco e la potenza media aumentavano con l'età, con i gruppi di età più avanzata che mostravano valori superiori rispetto a quelli più giovani (Figura 9). Inoltre, ha sottolineato che la massa corporea e la massa magra sono i principali determinanti della potenza anaerobica, sebbene una piccola parte della varianza resti da attribuire ad altri fattori, come la tecnica e la coordinazione neuromuscolare.

Anaerobic power of the study participants

	Age groups									
	U13	U14	U15	U16	U17	U18	U19	U20	U21	Control
$P_{\text{peak}}$ (W)	452.36 (114.85) < U15	566.16 (111.41) < U16	626.4 (115.09) < U17	714.27 (122.72) < U20	769.48 (142.35)	774.21 (149.69)	769.66 (94.31)	839.36 (75.35)	852.92 (80.57)	867.86 (89.07)
$rP_{\text{peak}}$ ( $W \cdot \text{kg}^{-1}$ )	9.56 (0.68) < U16	9.64 (1.15) < U16	10.31 (0.92) < U18	10.91 (0.83)	10.63 (1.05)	11.23 (0.97)	10.99 (0.81)	11.52 (0.6)	11.21 (0.94)	11.37 (0.66)
$P_{\text{mean}}$ (W)	356.7 (82.58) < U14	450.9 (91.99) < U16	490.6 (92.36) < U16	564.5 (90.94) < U20	601.1 (91.14) < Control	614.3 (89.94) < Control	605.6 (58.92)	662 (75.37)	686.4 (55.98)	697.8 (62.07)
$rP_{\text{mean}}$ ( $W \cdot \text{kg}^{-1}$ )	7.6 (0.75) < U16	7.73 (0.96) < U16	8.07 (0.88) < U18	8.61 (0.89)	8.56 (1)	8.97 (0.58)	8.66 (0.46)	9.03 (0.78)	9.13 (0.89)	9.16 (0.54)
$P_{\text{min}}$ (W)	264.1 (51.01) < U15	338.3 (70.15) < U16	359.6 (87.97) < U17	408.5 (80.55) < U21	427.4 (70.59) < U21	442.9 (57.58) < Control	427.6 (73.65) < Control	468.5 (87.34)	513 (59.74)	521.8 (54.18)
$rP_{\text{min}}$ ( $W \cdot \text{kg}^{-1}$ )	5.68 (0.73) < Control	5.83 (0.87) < Control	5.93 (1.07) < Control	6.26 (1.1)	6.11 (0.98)	6.51 (0.68)	6.1 (0.83)	6.39 (1.09)	6.83 (0.95)	6.86 (0.69)
Fatigue index (%)	40.45 (7.69)	39.35 (8.72)	42.26 (10.84)	42.53 (9.1)	42.27 (8.71)	41.76 (7.86)	44.36 (7.91)	44.22 (9.26)	39.55 (7.52)	39.56 (6.12)

Values are presented as mean with standard deviation in brackets. BMI – body mass index;  $P_{\text{peak}}$  – peak power;  $P_{\text{mean}}$  – mean power;  $P_{\text{min}}$  – minimal power;  $rP_{\text{peak}}$  – relative peak power;  $rP_{\text{mean}}$  – relative mean power;  $rP_{\text{min}}$  – relative minimal power. < indicates significant difference between age groups based on Bonferroni post-hoc analysis

Figura 9 - Nikolaïdis (2011)

La figura 10 mostra le differenze legate all'età nella potenza anaerobica assoluta e relativa alla massa corporea, espressa come percentuale rispetto ai valori del gruppo di controllo adulto, evidenziando come la potenza aumenti con l'età fino a raggiungere i livelli degli adulti.

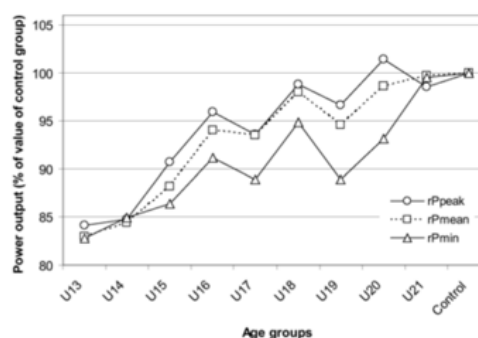
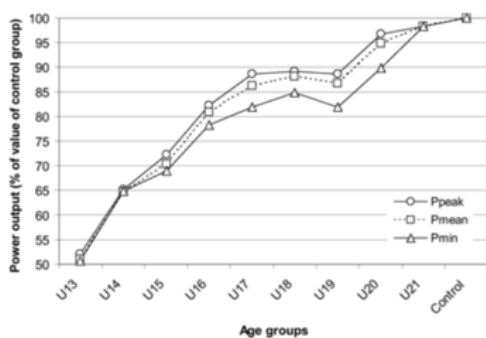


Figura 10 - Nikolaïdis (2011)

#### 4.4 Effetti della maturità puberale sugli enzimi

Eriksson et al. (1974) hanno osservato che nei ragazzi di 11 anni l'attività a riposo della fosfofruttochinasi (PFK) era circa il 33% rispetto ai valori tipici degli adulti, mentre l'attività della succinico deidrogenasi risultava essere circa il 125% rispetto a quella degli adulti.

Ulteriori studi citati da Eriksson hanno confermato che l'attività degli enzimi ossidativi, responsabili del metabolismo aerobico, è maggiore nei ragazzi di 13-15 anni rispetto ai giovani adulti, e nei bambini di 6 anni rispetto agli adolescenti di 13 e 17 anni. Inoltre, l'attività degli enzimi anaerobici è risultata inferiore nei bambini di 3-11 anni rispetto agli adulti, mentre nei ragazzi di 13-15 anni tali attività sono paragonabili a quelle degli adulti. Tuttavia, durante l'adolescenza, si osserva una minore proporzione di attività degli enzimi glicolitici rispetto a quelli ossidativi, con un rapporto tra l'attività della PFK e quella dell'isocitrato deidrogenasi (ICDH) del 93% più elevato negli adulti rispetto agli adolescenti. Questi risultati suggeriscono una maturazione progressiva delle capacità metaboliche anaerobiche con l'età, con una prevalenza dell'attività ossidativa durante l'infanzia e l'adolescenza.

Berg e Keul (1988), in accordo con Eriksson, hanno riscontrato che l'attività degli enzimi glicolitici è positivamente correlata con l'età. In particolare, il loro lavoro indica che il rapporto tra attività glicolitica e ossidativa è del 59% più alto nei giovani adulti rispetto ai bambini, e del 42% più alto negli adolescenti rispetto ai bambini. I dati di Haralambie (1982) confermano che il rapporto tra PFK e ICDH era del 93% più elevato negli adulti rispetto agli adolescenti, con valori rispettivi di 1,633 e 0,844.

In sintesi, le evidenze suggeriscono che i bambini presentano un'attività enzimatica glicolitica inferiore rispetto agli adolescenti, ma sono più efficienti nell'ossidazione del piruvato e degli acidi grassi a catena libera (FFA) rispetto agli adolescenti, che a loro volta mostrano una

capacità aerobica superiore rispetto agli adulti. Pertanto, i ragazzi sembrano svantaggiati rispetto agli adolescenti più grandi e agli adulti in sport di breve durata e ad alta intensità, che dipendono dalla glicogenolisi/glicolisi.

#### 4.5 Effetti della maturità puberale sugli adattamenti neuromuscolari

Sia isolatamente che in combinazione con altre variabili come la fitness anaerobica e aerobica, la forza rappresenta un fattore determinante del successo sportivo, specialmente durante l'adolescenza. Una maggiore forza muscolare può contribuire direttamente al miglioramento delle prestazioni in molti sport, differenziando un atleta d'élite da uno meno performante (Armstrong et al., 2011).

Pertanto, l'allenamento di forza o resistenza può essere definito come un metodo per sviluppare la fitness muscoloscheletrica attraverso un ampio spettro di carichi con diversi scopi, come aumentare la performance sportiva, migliorare la salute e prevenire e riabilitare lesioni (Sánchez Pastor et al., 2023).

Secondo Cunha et al. (2019), la forza muscolare aumenta progressivamente dagli 8 ai 18 anni, con un picco di crescita legato alla maturazione biologica. Durante questo periodo, si osservano aumenti significativi in altezza, massa muscolare e ossea, oltre a cambiamenti nell'architettura muscolare, che portano a incrementi sostanziali della forza muscolare assoluta e della coppia. La forza muscolare è una variabile cruciale per la performance sportiva, e il suo sviluppo è associato a miglioramenti in abilità specifiche del calcio, come tiri, salti, sprint, difesa, cambi di direzione e stabilità articolare. La maturazione biologica influisce positivamente non solo sulla forza, ma anche sulla potenza esplosiva, sulla velocità, sulla performance aerobica e sulle abilità sportive specifiche.

In relazione alla crescita adolescenziale, i dati indicano coerentemente che il picco dello sviluppo della forza si verifica circa 1,0-1,5 anni dopo il PHV, e si allinea maggiormente con il PWV e di maturazione (PMV). Durante questo periodo, le fibre muscolari aumentano di dimensione da quattro a cinque volte rispetto all'infanzia, con variazioni tra gli arti superiori e inferiori, raggiungendo il loro massimo volume nella tarda adolescenza o nella giovane età adulta. Analogamente, la percentuale di fibre muscolari di tipo II aumenta fino a raggiungere i valori tipici degli adulti nella tarda adolescenza. Sebbene non siano disponibili dati specifici sulla relazione tra la distribuzione delle fibre muscolari e la forza volontaria nei bambini, le

fibre di tipo IIX e IIA nei quadricipiti degli adulti hanno dimostrato una velocità di accorciamento maggiore rispetto alle fibre di tipo I (Armstrong et al., 2011).

L'area trasversale del muscolo è strettamente correlata con la forza, anche se esiste ancora un dibattito riguardo all'eventualità che la forza in relazione all'area trasversale muscolare aumenti con l'età (Armstrong et al., 2011). Inoltre, i cambiamenti nell'angolo di pennazione muscolare, che si verificano con l'aumento della dimensione muscolare durante la crescita, influenzano l'espressione della forza in relazione all'area trasversale, soprattutto durante l'adolescenza (Armstrong et al., 2011).

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) raccomanda che bambini e adolescenti dai 5 ai 17 anni svolgano almeno 60 minuti di attività fisica di intensità moderata o vigorosa ogni giorno. Inoltre, è consigliato includere attività di rafforzamento muscolare e osseo almeno 3 volte a settimana, che possono essere attività sportive o ricreative (come riportato da Sánchez Pastor et al., 2023).

La ricerca indica sempre più che l'allenamento di “resistance training” può offrire benefici unici per bambini e adolescenti quando prescritto e supervisionato adeguatamente. L'accettazione di questa metodica per i giovani è ormai ampiamente approvata dalle organizzazioni mediche, del fitness e sportive, e sta diventando sempre più diffusa a livello globale (Faigenbaum et al., 2009).

Oggi i programmi scolastici sono progettati appositamente per migliorare le componenti della forma fisica legate alla salute, includendo anche lo sviluppo della forza muscolare. Con il crescente numero di bambini e adolescenti che si allenano con i pesi nelle scuole, nei centri fitness e nei centri di allenamento sportivo, diventa fondamentale stabilire pratiche sicure, efficaci e piacevoli che permettano all'allenamento di resistenza di migliorare la salute, la forma fisica e le prestazioni sportive dei giovani. La National Strength and Conditioning Association (NSCA) riconosce e sostiene che molti dei benefici associati ai programmi di allenamento con sovraccarichi per adulti possono essere ottenuti anche da bambini e adolescenti, purché si seguano linee guida specifiche per l'età.

A tal proposito, come riportato da Faigenbaum et al. (2009), la NSCA dichiara che:

1. Un programma di allenamento di allenamento della forza progettato e supervisionato correttamente è relativamente sicuro per i giovani.
2. Un programma di allenamento di allenamento della forza progettato e supervisionato correttamente può migliorare la forza muscolare e la potenza dei giovani.

3. Un programma di allenamento di allenamento della forza progettato e supervisionato correttamente può migliorare il profilo di rischio cardiovascolare dei giovani.
4. Un programma di allenamento di allenamento della forza progettato e supervisionato correttamente può migliorare le prestazioni delle abilità motorie e può contribuire a migliorare le prestazioni sportive dei giovani.
5. Un programma di allenamento di allenamento della forza progettato e supervisionato correttamente può aumentare la resistenza degli atleti giovani agli infortuni sportivi.
6. Un programma di allenamento di allenamento della forza progettato e supervisionato correttamente può aiutare a migliorare il benessere psicosociale dei giovani.
7. Un programma di allenamento di allenamento della forza progettato e supervisionato correttamente può aiutare a promuovere e sviluppare abitudini di esercizio durante l'infanzia e l'adolescenza.

Negli anni '70 e '80, uno dei motivi per cui l'allenamento della forza non era spesso raccomandato per bambini e adolescenti era il presunto alto rischio di infortunio associato a questo tipo di esercizio.

In uno studio prospettico citato da Faigenbaum et al., (2009) che ha valutato l'incidenza degli infortuni correlati allo sport nei giovani in età scolare per un periodo di un anno, l'allenamento con i sovraccarichi ha rappresentato lo 0,7% di 1576 infortuni mentre il football, il basket e il calcio hanno rappresentato rispettivamente circa il 19%, 15% e 2% di tutti gli infortuni.

In generale, gli infortuni correlati all'allenamento con i sovraccarichi negli atleti delle scuole superiori sembrano coinvolgere la progressione aggressiva dei carichi di allenamento o tecniche di esercizio improprie. Le attuali scoperte derivanti da studi prospettici indicano un basso rischio di infortunio nei bambini e negli adolescenti che seguono linee guida di allenamento appropriate per l'età (Faigenbaum et al., 2009).

Poiché i movimenti di sollevamento pesi coinvolgono schemi di attivazione neurale più complessi rispetto ad altri esercizi con i sovraccarichi, l'infanzia potrebbe essere il momento ideale per sviluppare la coordinazione e la tecnica necessarie per eseguire correttamente questi sollevamenti (Faigenbaum et al., 2009).

In aggiunta questo periodo risulta fertile per l'apprendimento. Secondo i dati pubblicati di imaging neuromagnetico da Behringer et al. (2011), una ridotta inibizione corticale motoria nei soggetti immaturi, promuove la plasticità neurale e, di conseguenza, l'apprendimento motorio nei bambini. Una ridotta inibizione GABAergica può essere trovata nei bambini a causa

dell'imaturità delle vie intracorticali inibitorie (interneuroni GABAergici) e che questo può facilitare la plasticità neurale e l'apprendimento motorio nei bambini (Behringer et al. (2011).

Gli allenatori dei giovani dovrebbero essere consapevoli della notevole quantità di tempo necessaria per insegnare questi sollevamenti e dovrebbero conoscere la progressione dagli esercizi di base (ad esempio, squat frontale) agli esercizi di trasferimento di abilità (ad esempio, squat overhead) e infine ai sollevamenti competitivi (strappo e slancio).

Un'altra preoccupazione legata all'allenamento con i sovraccarichi per i giovani riguarda la sicurezza e l'adeguatezza dell'allenamento pliometrico (chiamato anche esercizio con ciclo di stiramento-accorciamento) per bambini e adolescenti. A differenza degli esercizi tradizionali per la costruzione della forza, l'allenamento pliometrico condiziona il corpo attraverso movimenti dinamici che coinvolgono un'azione muscolare eccentrica rapida seguita immediatamente da un'azione muscolare concentrica rapida (Faigenbaum et al., 2009). Quando lo stiramento e l'accorciamento di un muscolo vengono eseguiti rapidamente, la forza generata durante l'azione muscolare è maggiore rispetto alla forza che sarebbe generata se il muscolo non fosse stirato immediatamente prima dell'azione muscolare. L'affermazione che l'allenamento pliometrico appropriato per l'età sia pericoloso per i giovani o che un livello di forza di base predeterminato (ad esempio, uno squat massimo ripetizione [1RM] pari a 1,5 volte il peso corporeo) debba essere un prerequisito per l'allenamento pliometrico della parte inferiore del corpo non è supportata dalla ricerca attuale e dalle osservazioni cliniche. In effetti, i programmi completi di allenamento di resistenza che includono esercizi pliometrici hanno dimostrato di migliorare la biomeccanica del movimento, migliorare le capacità funzionali e ridurre il numero di infortuni legati allo sport nei giovani atleti (Faigenbaum et al., 2009).

Tuttavia, esiste il potenziale per lesioni o malattie se l'intensità, il volume o la frequenza dell'allenamento pliometrico superano le capacità dei partecipanti. Inoltre, non ci sono evidenze che suggeriscano che l'allenamento della forza influenzi negativamente la crescita e la maturazione durante l'infanzia e l'adolescenza.

Un'area di preoccupazione comune riguardo l'allenamento della forza nei giovani è il possibile rischio di danni alla cartilagine di crescita, che si trova in tre aree principali del corpo in sviluppo: le placche di crescita alle estremità delle ossa lunghe, la cartilagine che riveste le superfici articolari e i punti in cui i tendini principali si attaccano alle ossa (apofisi) (Faigenbaum et al., 2009). Poiché la cartilagine di crescita è un tessuto più debole rispetto al tessuto connettivo circostante, è più vulnerabile ai danni causati da microtraumi ripetitivi (Faigenbaum et al., 2009). Le potenziali lesioni ai tessuti molli da uso ripetitivo è un'altra

preoccupazione legata all'allenamento con i sovraccarichi per i giovani (Faigenbaum et al., 2009).

Secondo Sánchez Pastor et al. (2023) sottoporre le cartilagini di crescita allo stress meccanico attraverso l'allenamento di forza è benefico per la crescita del corpo e delle ossa.

Vi è un rischio aumentato di infortunio per i bambini e gli adolescenti che utilizzano attrezzature a casa, in parte a causa di comportamenti non sicuri, malfunzionamenti delle attrezzature e mancanza di supervisione. Vi è anche il potenziale per un infortunio catastrofico se non vengono seguiti gli standard di sicurezza. In un case-report, un bambino di 9 anni è morto quando un bilanciere è rotolato dal supporto della panca e gli è caduto sul petto (D H George et al., 1989). Questi risultati sottolineano l'importanza di fornire una supervisione stretta e attrezzature da allenamento sicure per tutti i programmi di allenamento con i sovraccarichi dei giovani. Ulteriori infortuni possono essere evitati consentendo un adeguato recupero tra le sessioni di allenamento e ascoltando le domande e le preoccupazioni di ogni bambino (Faigenbaum et al., 2009). In generale, il rischio di infortunio associato all'allenamento con i sovraccarichi è simile per i giovani e gli adulti (Faigenbaum et al., 2009). Non ci sono ragioni di sicurezza giustificabili che precludano ai bambini o agli adolescenti di partecipare a un tale programma di allenamento con i sovraccarichi. Le modalità di allenamento con i sovraccarichi includono macchine con pacchi-peso (sia per adulti che per bambini), pesi liberi come manubri, kettlebell, powerbag etc., macchine idrauliche, macchine pneumatiche, palle mediche; bande elastiche, contrazioni isometriche ed esercizi a corpo libero. Gli adattamenti all'allenamento che si verificano nei giovani sono specifici per l'azione muscolare o i gruppi muscolari allenati (Faigenbaum et al., 2009).

Nei ragazzi prepuberi, sembra che i guadagni di forza indotti dall'allenamento siano maggiormente correlati agli adattamenti neurologici e neuromotori (Ramsay et al., 1990; Ozmun et al., 1994; Matos & Winsley, 2017) piuttosto che ai fattori ipertrofici (Faigenbaum et al., 2009). Senza aumenti corrispondenti nella massa magra, sembra che gli adattamenti neurali (ad esempio, aumento dell'attivazione delle unità motorie e cambiamenti nella coordinazione, nel reclutamento e nella frequenza di scarica delle unità motorie) e, possibilmente, adattamenti muscolari intrinseci (come evidenziato dagli aumenti nella coppia di contrazione) siano principalmente responsabili dei guadagni di forza indotti dall'allenamento durante la preadolescenza (Faigenbaum et al., 2009). Anche i miglioramenti nella performance delle abilità motorie e nella coordinazione dei gruppi muscolari coinvolti possono svolgere un ruolo

significativo, poiché gli aumenti di forza indotti dall'allenamento sono tipicamente maggiori rispetto ai cambiamenti nell'attivazione neuromuscolare (Faigenbaum et al., 2009).

Durante la pubertà, la secrezione di testosterone testicolare nei maschi è associata a considerevoli aumenti della massa magra e della crescita lineare (Faigenbaum et al., 2009). I guadagni di forza indotti dall'allenamento durante e dopo la pubertà nei maschi possono quindi essere associati a cambiamenti nei fattori ipertrofici poiché il testosterone e altre influenze ormonali sull'ipertrofia muscolare sarebbero operanti (Faigenbaum et al., 2009).

Secondo la meta-analisi di Behringer et al. (2011) i programmi strutturati di allenamento con i sovraccarichi migliorano significativamente le prestazioni di corsa, salto e lancio nei bambini e negli adolescenti. Poiché le abilità motorie sono componenti essenziali in diversi tipi di sport, si può presumere che ci sia un trasferimento positivo degli effetti dell'allenamento di resistenza alla performance sportiva specifica nei giovani atleti. L'età dei partecipanti era negativamente correlata ai miglioramenti delle abilità motorie indotti dall'allenamento (espressi in dimensioni d'effetto combinate), indicando che i soggetti più giovani ottenevano i maggiori miglioramenti nelle suddette abilità. Poiché ci sono poche evidenze di ipertrofia nei bambini, si assume generalmente che i guadagni di forza indotti dall'allenamento nei soggetti più giovani siano più legati ad adattamenti neurali che ai fattori ipertrofici.

La systematic-review di Sanchez Pastor (2023) ha descritto l'efficacia dei programmi di allenamento di forza nei giovani, con particolare riferimento ai soggetti prepuberi (473 ragazzi). L'analisi di 104 programmi ha mostrato che la maggior parte degli allenamenti di forza ha utilizzato una periodizzazione lineare o non lineare (83,65%), con una durata di 8-12 settimane (81,73%), una frequenza di due giorni a settimana (81,73%) e un'intensità moderata (61,76%). Gli esercizi erano prevalentemente multiarticolari (72,12%), con movimenti ad alta velocità (82,86%) e volumi di allenamento bassi (88,46%).

Gli adattamenti neuromuscolari sono stati significativi, con aumenti evidenti nella capacità di salto, capacità di sprint e forza muscolare. Anche l'agilità, la coordinazione e la flessibilità sono migliorate. Sul piano morfologico, il 95% degli interventi ha riportato una riduzione della percentuale di grasso corporeo ed un aumento della massa magra nell'89,47% dei casi nei maschi. L'aumento della massa muscolare nei bambini prepuberali è molto basso o inesistente. Di conseguenza, questo guadagno è probabilmente dovuto all'aumento del tessuto muscolare causato dallo sviluppo maturativo dei bambini. D'altra parte, la diminuzione del grasso corporeo è stata probabilmente dovuta all'aumento della spesa energetica risultante dall'allenamento di forza, causando, di conseguenza, un deficit calorico. L'autore sottolinea come gli aumenti della

forza muscolare sono principalmente prodotti da adattamenti neurali, soprattutto a causa dell'alta plasticità neurale e dei rapidi cambiamenti nella mielinizzazione che si verificano in prepubertà.

Secondo McQuilliam et al. (2006), i soggetti che maturano precocemente tendono a godere di un vantaggio rispetto ai coetanei che maturano più tardi, grazie a una maggiore forza e potenza durante la fase adolescenziale. Tuttavia, sebbene questi individui possano essere fisicamente dominanti durante l'adolescenza a causa della loro maturazione accelerata, questo vantaggio potrebbe non persistere una volta raggiunta la completa maturazione.

Nella sua ricerca, McQuilliam et al. (2006) hanno descritto in modo dettagliato i cambiamenti che si verificano durante il processo di maturazione:

Durante questa fase di maturazione (pre-PHV), concentrazioni relativamente basse di androgeni circolanti, come il testosterone e l'ormone della crescita, limitano la capacità di adattamenti morfologici del muscolo scheletrico. È possibile trovarsi in stadi molto diversi di maturazione biologica avendo la stessa età cronologica; quindi, i professionisti devono essere consapevoli che gli individui all'interno dello stesso gruppo potrebbero richiedere stimoli di allenamento differenti.

Poiché il testosterone è un potente stimolatore della sintesi proteica muscolare e inibitore della degradazione proteica muscolare, ne consegue che, durante il periodo di maturazione, i ragazzi più delle ragazze sperimentano un significativo accrescimento della massa muscolare, che è il principale determinante fisiologico della forza massima (McQuilliam et al., 2006).

Man mano che la capacità di generare forza migliora può essere applicata più forza nello stesso lasso di tempo, risultando in una maggiore produzione di potenza.

Durante l'adolescenza, nei maschi si verifica una redistribuzione delle fibre muscolari, passando da una prevalenza di fibre di tipo I a fibre di tipo II. Le fibre di tipo II presentano un'area della sezione trasversa maggiore (CSA), che consente una produzione di forza superiore rispetto alle fibre di tipo I, oltre a un ciclo di "attacco/sgancio" più rapido dei ponti trasversali, permettendo una maggiore velocità di accorciamento e, quindi, una maggiore produzione di potenza (McQuilliam et al., 2006). Inoltre, l'aumento della lunghezza degli arti durante la crescita scheletrica può incrementare il momento interno, aumentando così la produzione di coppia.

Sebbene ci siano grandi aumenti di forza e potenza durante il PHV, i maggiori guadagni tendono a verificarsi all'inizio del PWV (la velocità di picco di peso (ovvero la fase in cui si verifica il tasso di picco di accumulo di muscolo scheletrico associato alla maturazione)). Ciò avviene

tipicamente tra 6 mesi a un anno dopo il PHV, quando il tasso di accumulo di massa magra è il più elevato.

In relazione alla morfologia muscolare, sono tre i fattori chiave che influenzano la produzione dei valori di potenza: l'area trasversale fisiologica del muscolo (CSA), la lunghezza dei fascicoli muscolari e l'angolo di pennazione dei fascicoli muscolari, tutti quantificabili tramite ecografia. In breve, la CSA fisiologica del muscolo rappresenta l'area trasversale del numero totale di fibre muscolari, perpendicolare al loro asse lungo. La lunghezza dei fascicoli muscolari è definita dal numero di sarcomeri in serie, con fibre muscolari più lunghe in grado di contrarsi più velocemente rispetto a quelle più corte. L'angolo di pennazione dei fascicoli muscolari, ovvero l'angolo in cui i fascicoli si inseriscono nell'aponeurosi, aumenta a causa dell'ipertrofia delle fibre, causata da un aumento del numero di sarcomeri disposti in parallelo.

I muscoli con CSA delle fibre più grandi e maggiori angoli di pennazione producono maggiori forze, mentre i muscoli con fascicoli più lunghi e angoli di pennazione più piccoli hanno una maggiore velocità di accorciamento.

Interessatamente, la lunghezza dei fascicoli muscolari e l'angolo di pennazione sembrano essere parametri indipendenti dalla maturazione. Non sembra esserci differenza nella lunghezza dei fascicoli muscolari quando normalizzata per l'altezza corporea e l'angolo di pennazione dei fascicoli muscolari sembra essere comparabile tra bambini, adolescenti e adulti.

A tal proposito, possiamo sottendere che gli atleti maturi richiedono carichi di allenamento relativi maggiori per massimizzare le adattabilità, basati sulla maggiore forza massima relativa o 1RM. La forza massima sottostà alle qualità di prestazione muscolare atletica come la potenza di picco. Alti livelli di forza possono influenzare abilità specifiche dello sport e aumentare l'altezza del salto e la performance di sprint nel calciatore, ad esempio.

In termini metodologici, una meta-analisi di Lesinski et al. (2016). hanno mostrato che l'intensità più efficace per migliorare la forza nei giovani atleti è compresa tra l'80 e l'89% del 1RM.

L'allenamento ad alte percentuali della forza massima svolge un ruolo cruciale nel modificare le proprietà dei tendini negli atleti adolescenti. In particolare, l'aumento dell'area trasversale del tendine indotta dall'allenamento con sovraccarichi può ridurre la tensione tendinea e diminuire l'incidenza delle tendinopatie.

Lesinski et al. (2016) hanno sottolineato che migliorare la forza di un atleta può potenziare sia l'accelerazione iniziale che la velocità massima nello sprint. L'accelerazione iniziale è particolarmente vantaggiosa in sport come il calcio, dove si verificano circa 60 accelerazioni

per partita. L'impulso (forza moltiplicata per il tempo) è un determinante fondamentale per l'accelerazione. Tuttavia, poiché il tempo di contatto con il suolo è limitato, è essenziale massimizzare la produzione di forza durante questa finestra temporale. Esiste una forte correlazione tra la forza assoluta nello squat e la performance nello sprint, dovuta a un maggiore tasso di sviluppo della forza (RFD) e, di conseguenza, a una maggiore forza di reazione del suolo. Pertanto, la forza massima è stata identificata come un fattore chiave per ottimizzare l'accelerazione iniziale, poiché tempi di contatto con il suolo superiori a 200 ms permettono un trasferimento di forza più efficace.

Come discusso in precedenza per i metabolismi energetici, anche la forza muscolare è influenzata dallo stadio puberale. In questo contesto, Cunha et al. (2019) hanno condotto uno studio per esaminare l'influenza dello stato di maturazione, valutato secondo i criteri di Tanner, sulle coppie muscolari isometriche e dinamiche, correttamente normalizzate, e sull'architettura muscolare nei giovani calciatori. Di seguito, i risultati del suo studio:

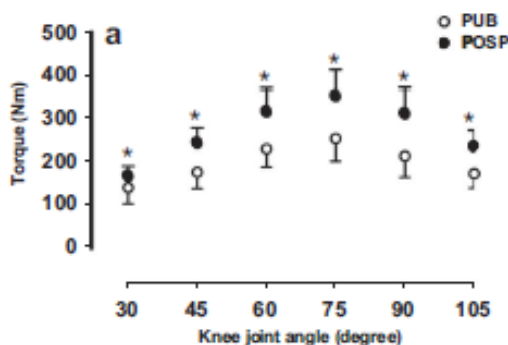


Figura 11 -Relazione tra Torque - coppia muscolare(Nm) - Angolo al ginocchio

Gli atleti post-puberale (POSP) hanno dimostrato di avere una forza muscolare maggiore rispetto ai coetanei puberali (PUB), indipendentemente dall'angolo di misurazione. Questo suggerisce che la maturazione fisica post-puberale contribuisce significativamente all'aumento della forza muscolare isometrica. (Figura 11)

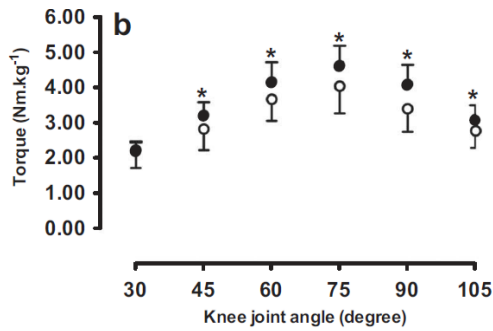


Figura 12 - Relazione tra Torque - coppia muscolare (Nm) - Angolo al ginocchio, normalizzata alla massa Corporea ( $\text{Nm} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Anche quando la forza è stata normalizzata rispetto alla massa corporea, gli atleti post-puberali hanno mostrato prestazioni superiori rispetto ai puberali. Questo risultato evidenzia che la maturazione post-puberale conferisce un vantaggio significativo in termini di forza, anche considerando le differenze di massa corporea. (Figura 12)

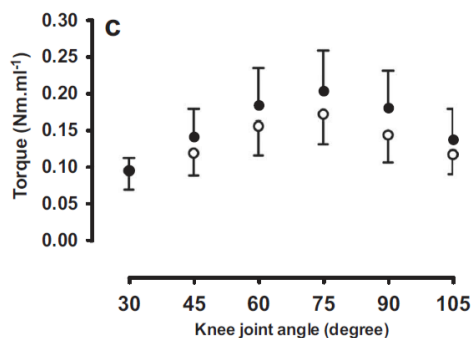


Figura 13 - Relazione tra Torque - coppia muscolare (Nm) - Angolo al ginocchio, normalizzata per volume muscolare ( $\text{Nm} \cdot \text{ml}^{-1}$ )

Nonostante le differenze di maturazione tra i gruppi, quando la forza è stata normalizzata per il volume muscolare, non sono emerse differenze significative tra i gruppi (Figura 13). Questo suggerisce che la maturazione potrebbe non influenzare direttamente la relazione tra forza e volume muscolare.

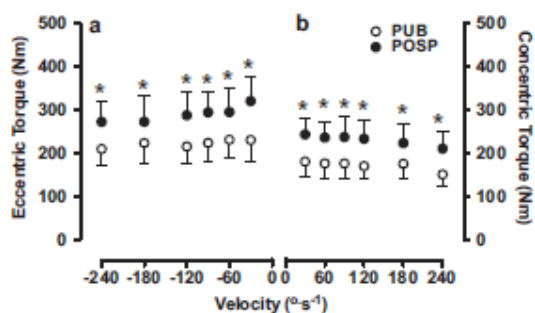


Figura 14 – a) Relazione tra Eccentric Torque - coppia muscolare ecc.(a) ; Concentric Torque - coppia muscolare conc. (b)(Nm) – Velocità angolare ( $^{\circ}\text{s}^{-1}$ )

14,a) Gli atleti post-puberale hanno mostrato valori superiori di forza eccentrica assoluta rispetto ai puberali, indipendentemente dalla velocità angolare. Questo indica che la maturazione post-puberale è associata a un miglioramento delle capacità di forza eccentrica.

14,b) Analogamente alla forza eccentrica, gli atleti post-puberale hanno ottenuto risultati migliori anche nella forza concentrica assoluta rispetto ai puberali, indipendentemente dalla velocità angolare. Questo rafforza l'idea che la maturazione post-puberale contribuisce a un miglioramento complessivo delle capacità di forza muscolare.

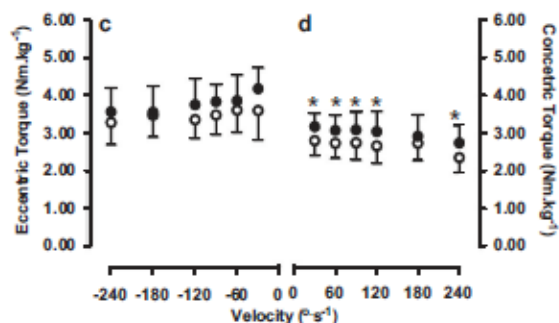


Figura 15 -Relazione tra Eccentric Torque - coppia muscolare ecc. (c); Concentric Torque - coppia muscolare conc. (d) (Nm) – Velocità angolare ( $^{\circ}\text{s}^{-1}$ ), relativa alla massa corporea ( $\text{Nm}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

15,c) Le differenze nella forza eccentrica relativa alla massa corporea tra gli atleti puberali e post-puberale non sono risultate significative, il che suggerisce che, nonostante la velocità di contrazione influenzi la forza eccentrica, la maturazione da sola non sembra avere un impatto rilevante su questa relazione quando la forza è normalizzata per la massa corporea.

15,d= Gli atleti post-puberale hanno mostrato una forza concentrica relativa alla massa corporea superiore rispetto ai puberali, suggerendo che la maturazione ha un effetto positivo sulla forza concentrica. Questo supporta l'idea che lo sviluppo fisico post-puberale migliora la capacità muscolare, specialmente in termini di forza concentrica, anche quando si tiene conto della massa corporea.

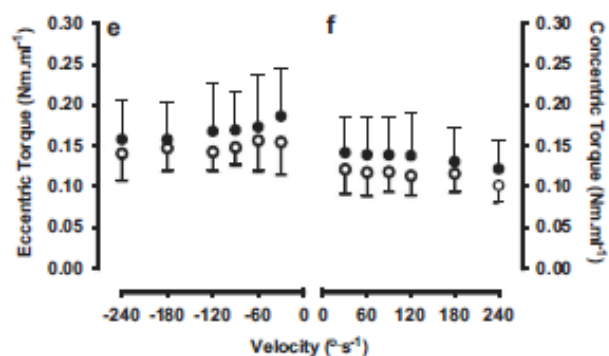


Figura 16-Relazione tra Eccentric Torque - coppia muscolare eccentrica (Nm) (e) ; “Concentric Torque” - coppia muscolare concentrica (Nm) (f) – Velocità angolare (°s-1 ), relativa al volume muscolare (Nm.ml<sup>-1</sup>)

16e): La velocità esercita un'influenza significativa sulla coppia eccentrica quando questa è normalizzata per il volume muscolare, indipendentemente dal gruppo di appartenenza (prepuberi o post-puberi). Questo potrebbe indicare che la capacità di generare coppia eccentrica dipende maggiormente dalla velocità di contrazione muscolare piuttosto che dalla maturazione muscolare o dalla quantità di muscolo.

16f): La velocità di contrazione muscolare ha un ruolo predominante nella determinazione della coppia concentrica relativa al volume muscolare, indipendentemente dal livello di maturazione. Questo indica che la capacità di generare forza concentrica è più influenzata dalla velocità di movimento piuttosto che dal volume muscolare o dallo stato di maturazione muscolare.

La maturazione biologica è una variabile fondamentale nello sviluppo della forza nei bambini e negli adolescenti, poiché durante questo periodo si osservano significativi aumenti in altezza, massa corporea, massa magra, area della sezione trasversale muscolare (CSA), e volume muscolare (MV) (Cunha et al. (2019)). Inoltre, si verificano incrementi nei livelli di testosterone, produzione di IGF-I, mielinizzazione e sviluppo del sistema nervoso, oltre a cambiamenti nell'architettura muscolare (Cunha et al. (2019)). Tuttavia, questo studio di Cunha (2019) conferma i cambiamenti nelle dimensioni corporee e nel volume muscolare, senza supportare i

cambiamenti previsti nell'architettura muscolare. Questi risultati suggeriscono che, sebbene la maturazione influisca su alcune variabili fisiche, l'architettura muscolare potrebbe essere meno sensibile alle variazioni di maturazione.

Anche Meylan et al. (2014) hanno esaminato le prestazioni fisiche in relazione allo stato di maturità (Pre-PHV, mid-PHV, post-PHV; utilizzando il metodo di Mirwald et al., 2002) attraverso l'analisi della forza, velocità e capacità di salto. Il programma di allenamento di Meylan et al. (2014) ha indotto cambiamenti significativi nelle prestazioni atletiche dei partecipanti, variando in base allo stato di maturità. Il programma di allenamento consisteva in due sessioni settimanali di 45 minuti di allenamento con i pesi per una durata di 8 settimane, seguite da un periodo di detraining di altre 8 settimane. I gruppi mid- e post-PHV hanno beneficiato maggiormente dell'allenamento di forza, migliorando significativamente le prestazioni nello sprint e la potenza massima (Pmax) rispetto al gruppo pre-PHV. Tuttavia, il periodo di detraining ha mostrato un impatto negativo più marcato nel gruppo pre-PHV, evidenziando una minore resilienza agli effetti del detraining rispetto ai gruppi più maturi.

Gli esercizi erano progressivi sia in termini di carico che di complessità del movimento, suddivisi in quattro livelli (bronzo, argento, oro, platino; vedi figura 17). Tutti i partecipanti hanno iniziato al livello bronzo, con carichi determinati autonomamente con l'assistenza degli allenatori. Gli atleti avanzavano al livello successivo solo dopo aver completato con competenza il livello precedente, secondo la valutazione degli allenatori. Ogni esercizio prevedeva tre serie di 10-12 ripetizioni, tranne nelle sessioni in cui venivano introdotti nuovi esercizi, dove erano previste solo due serie.

Exercise progression during the two training blocks of 4 weeks

	Exercise level			
	Bronze	Silver	Gold	Platinum
Weeks 1–4				
Bulgarian split squat	Body mass	Front foot elevated	Dumbbells	Dumbbells front foot elevated
Lunge	Body mass in place	Body mass walking	Dumbbells walking	Dumbbells overhead walking
Hip thrust	Shoulder and feet on floor	Shoulder elevated	Single leg on floor	Single leg shoulder elevated
Single leg Romanian dead lift	Wall assisted	Body mass	Body mass hand reach	Dumbbells contralateral
Prone plank	Regular (60–90 s)	Alternate leg raise	Alternate leg raise hold	Alternate leg raise and abduction
Band hold	Straight hold	Rotation and hold	↑Band thickness	Partner disturbance
Weeks 5–8				
Step-up lunge	Low box	High box	Dumbbells high box	Dumbbells high box overhead
Single-leg squat	High box assisted	Low box assisted	High box unassisted	Low box unassisted
Hip thrust	Single leg floor	Single leg shoulder elevated	SL shoulder and feet elevated	Load single leg shoulder and feet elevated
Dead lift	Sandbag	↑Load	↑Load	↑Load
Carpet slide hip flexion	Knee to chest	Single leg knee to chest	Toe to hand	Single leg toe to hand
Side plank	Foot on floor	Foot elevated	Foot elevated and abduction hold	Foot elevated and abduction

Figura 17-Progressione degli esercizi durante le 8 settimane - Meylan et al. (2014)

Diversi studi riportati da Meylan et al. (2014) hanno evidenziato che lo sviluppo della forza e della potenza raggiunge un picco durante l'adolescenza, iniziando circa 1,5 anni prima del picco di velocità di crescita (PHV) e culminando circa 0,5-1,0 anni dopo. Prima della pubertà, l'aumento della potenza massima (Pmax) è principalmente dovuto al miglioramento della velocità ottimale, mentre negli adolescenti puberali e post-puberali è accompagnato da un incremento della forza ottimale. Di conseguenza, i programmi di allenamento giovanile dovrebbero inizialmente concentrarsi sulla coordinazione e velocità del movimento, riservando l'allenamento della forza per una fase successiva.

Un'ulteriore conferma dell'influenza della maturità sugli adattamenti all'allenamento della forza proviene dalla meta-analisi di Behringer et al. (2010). I risultati mostrano infatti che l'efficacia dell'allenamento varia in base allo stato maturativo, con i soggetti intrapuberi e postpuberi che hanno riportato una dimensione dell'effetto (ES) più elevata (1,91) rispetto ai prepuberi (0,81). Questo suggerisce che l'allenamento della forza risulti più efficace negli individui più maturi anche in questo studio.

#### 4.6 Effetti della maturità puberale sul modello prestativo del calcio giovanile ed il “Relative Age Effect” (RAE)

La maturità puberale rappresenta una fase cruciale nello sviluppo fisico e fisiologico degli adolescenti (Tanner, 1990) , influenzando significativamente le loro capacità atletiche e il loro potenziale di prestazione (Malina et al., 2004; Figueiredo et al., 2009; Francini et al., 2019). Nel contesto del calcio giovanile, dove il livello di competizione è sempre più elevato, comprendere come la maturazione biologica incida sulle performance dei giovani atleti è fondamentale per ottimizzare i programmi di allenamento, i processi di selezione e lo sviluppo del talento.

Durante la pubertà, come visto nei precedenti capitoli, i ragazzi subiscono una serie di cambiamenti ormonali, fisici e psicologici che possono variare notevolmente da individuo a individuo. Tali cambiamenti includono l'aumento della massa muscolare, la crescita ossea e il miglioramento delle capacità motorie, tutti elementi essenziali per l'efficacia e la competitività nel calcio. Tuttavia, le differenze nel timing e nella velocità di questi cambiamenti possono portare a discrepanze significative nelle capacità prestative tra giovani della stessa età cronologica.

In particolare, il RAE gioca un ruolo chiave nella comprensione di come la maturità puberale possa influenzare le prestazioni calcistiche. Il RAE si riferisce al vantaggio competitivo spesso osservato nei giovani atleti nati nei primi mesi dell'anno rispetto a quelli nati nei mesi successivi. Questo vantaggio è spesso correlato a una maturità biologica più avanzata, che può tradursi in migliori capacità fisiche come forza, velocità e potenza, elementi determinanti per il successo nel calcio (Bozděch et al., 2023).

Tuttavia, è importante notare che il RAE non sempre si traduce in un vantaggio per tutti gli atleti nati nel primo trimestre dell'anno. Il vantaggio legato al RAE deve essere contestualizzato, poiché fattori come il ruolo dell'atleta in squadra, il livello di competizione, e le caratteristiche individuali possono influenzare se e come il RAE incida sulla performance. In alcuni casi, infatti, una maturità fisica precoce potrebbe non offrire benefici a lungo termine, e potrebbe persino ostacolare lo sviluppo di abilità tecniche e tattiche in atleti che, sebbene fisicamente più sviluppati, potrebbero non avere lo stesso spazio per migliorare rispetto ai loro coetanei meno maturi (Goto et al., 2019).

Goto et al. (2019) hanno esaminato l'influenza della maturità biologica sulle prestazioni di corsa, durante il match, nei giocatori di calcio giovanili maschili élite di 8-16 anni. I risultati sono espressi nelle figure 18,19,20.

The speed zones (meters per second), pitch dimensions (meters) and match duration of the U11–U16 squads.

	U9	U10	U11	U12	U13	U14	U15 and U16
Standing and walking ( $m \cdot s^{-1}$ )	0.0–1.0	0.0–1.0	0.0–1.1	0.0–1.1	0.0–1.1	0.0–1.2	0.0–1.2
Jogging ( $m \cdot s^{-1}$ )	1.1–2.0	1.1–2.1	1.2–2.1	1.2–2.2	1.2–2.2	1.1–2.3	1.3–2.4
Low-speed running ( $m \cdot s^{-1}$ )	2.1–3.1	2.2–3.1	2.2–3.2	2.3–3.2	2.3–3.3	2.4–3.5	2.5–3.7
Moderate-speed running ( $m \cdot s^{-1}$ )	3.2–4.1	3.2–4.2	3.3–4.2	3.3–4.3	3.4–4.4	3.6–4.6	3.8–4.9
High-speed running ( $m \cdot s^{-1}$ )	>4.1	>4.2	>4.2	>4.3	>4.4	>4.6	>4.9
Pitch dimension (m)	44.8 × 26.0	44.8 × 26.0	78.7 × 54.1	78.7 × 54.1	88.0 × 64.2	100.8 × 68.2	100.8 × 68.2
Match duration	15 min × 4 or (20 min × 2 + 15 min × 2)	15 min × 4 or (20 min × 2 + 15 min × 2)	(20 min × 2 + 15 min × 2) or 25 min × 3	25 min × 3	25 min × 3	40 min × 2	40 min × 2

Figura 18-Zone di velocità (in metri al secondo), dimensioni del campo (in metri) e durata della partita nelle diverse categorie - Goto et al. (2019)

Chronological age, estimated chronological age at PHV, and match running distance (meters) of earlier and later maturers from the U9/U10, U11/U12, U13/U14, and U15/U16 age groups.\*

		U9/U10			U11/U12			U13/U14			U15/U16		
		Earlier	Later	<i>d</i>	Earlier	Later	<i>d</i>	Earlier	Later	<i>d</i>	Earlier	Later	<i>d</i>
N		11	11		13	13		8	8		8	8	
Chronological age (y)	Mean	9.3	9.3	0.12	11.6	11.6	0.14	13.8	13.4	0.74	15.6	15.3	0.45
	SD	0.4	0.5		0.5	0.5		0.4	0.6		0.6	0.6	
Sitting height (cm)	Mean	75.0	72.4	0.73	81.3†	78.0	0.93	92.0†	83.9	3.75	96.9†	92.1	1.66
	SD	2.7	4.3		4.2	2.6		2.6	1.5		2.3	3.4	
Estimated chronological age at PHV (y)	Mean	12.6†	13.0	1.48	13.2†	13.5	1.86	13.2†	13.8	3.43	13.3†	13.8	2.04
	SD	0.3	0.3		0.2	0.2		0.2	0.2		0.2	0.3	
Mean playing time (min)	Mean	57.5†	51.4	1.39	59.5	60.5	0.10	58.4	54.0	0.59	71.3	73.9	0.26
	SD	4.2	4.6		9.8	9.9		8.4	6.3		11.8	7.9	
Distance (m)													
Total	Mean	4,604†	4,069	1.24	5,613	5,754	0.17	6,167	5,598	0.64	7,967	8,289	0.28
	SD	541	287		852	826		1,120	559		1,481	721	
Walking	Mean	990‡	878	1.04	1,040	1,036	-0.02	977	897	0.75	1,265	1,240	0.10
	SD	94	119		154	227		133	72		304	174	
Jogging	Mean	1,692‡	1,490	0.96	1,684	1,713	0.09	1,820	1,758	0.21	2,558	2,658	0.30
	SD	244	168		303	334		244	327		398	249	
Low-speed running	Mean	1,214	1,058	0.66	1,508	1,530	0.07	1,715	1,661	0.14	2,253	2,416	0.37
	SD	294	162		370	264		500	245		573	254	
Moderate-speed running	Mean	509	467	0.33	869	912	0.25	1,001	866	0.49	1,251	1,255	0.02
	SD	143	105		184	147		360	155		352	130	
High-speed running	Mean	173	176	0.05	512	513	0.01	651†	417	1.99	639	719	0.43
	SD	78	44		168	112		144	85		231	123	

\*PHV = peak height velocity.  
†Significantly different to later maturers at  $p < 0.01$ .  
‡Significantly different to later maturers at  $p < 0.05$ .

Figura 19-Età cronologica, età cronologica stimata al PHV e distanza percorsa (in metri) durante la partita per le diverse zone di velocità, confrontando i maturatori precoci e tardivi nelle varie categorie - Goto et al. (2019).

Match running distance (meters per hour) and time spent (percent) in each speed zone in earlier and later maturers from the U9/U10, U11/U12, U13/U14, and U15/U16 age groups.

		U9/U10			U11/U12			U13/U14			U15/U16		
		Earlier	Later	<i>d</i>	Earlier	Later	<i>d</i>	Earlier	Later	<i>d</i>	Earlier	Later	<i>d</i>
N		11	11		13	13		8	8		8	8	
Distance (m·h <sup>-1</sup> )													
Total	Mean	4,800	4,771	0.08	5,682	5,734	0.14	6,314	6,230	0.24	6,698	6,748	0.13
	SD	370	376		393	362		412	279		462	297	
Standing and walking	Mean	1,035	1,022	0.17	1,052	1,023	-0.33	1,013	1,001	0.10	1,060	1,005	0.51
	SD	81	71		52	115		151	79		143	57	
Jogging	Mean	1,759	1,743	0.10	1,704	1,707	0.01	1,873	1,941	0.43	2,166	2,162	0.02
	SD	169	157		180	225		125	184		176	109	
Low-speed running	Mean	1,261	1,246	0.06	1,510	1,523	0.07	1,741	1,863	0.36	1,883	1,970	0.33
	SD	270	225		199	167		344	322		326	178	
Moderate-speed running	Mean	531	554	0.15	883	916	0.21	1,012	959	0.27	1,050	1,026	0.14
	SD	144	157		170	147		251	109		213	118	
High-speed running	Mean	180	207	0.40	533	520	-0.07	671*	466	1.89	539	585	0.35
	SD	78	54		210	126		117	98		165	85	
Percentage of time (%)													
Standing and walking	Mean	44.9	45.3	0.11	44.4	43.5	-0.19	41.3	40.1	0.32	38.1	37.6	0.13
	SD	4.5	4.5		3.7	4.8		4.3	3.1		5.5	2.8	
Jogging	Mean	34.7	34.1	0.23	30.0	30.2	0.06	30.9	32.4	0.45	34.7	34.5	0.11
	SD	2.5	2.8		3.1	3.3		2.5	4.1		2.9	1.4	
Low-speed running	Mean	14.8	14.5	0.11	15.9	16.1	0.14	17.1	18.2	0.36	17.5	18.3	0.33
	SD	3.0	2.6		2.2	1.8		3.4	2.8		3.0	1.6	
Moderate-speed running	Mean	4.4	4.6	0.18	6.8	7.1	0.28	7.2	6.9	0.26	7.0	6.8	0.18
	SD	1.1	1.3		1.3	1.1		1.9	0.8		1.4	0.8	
High-speed running	Mean	1.2	1.3	0.32	3.0	3.0	0.05	3.5*	2.5	1.80	2.7	2.9	0.36
	SD	0.5	0.3		1.1	0.8		0.7	0.5		0.8	0.4	

\*Significantly different to later maturers at  $p < 0.01$ .

Figura 20 -Distanza percorsa durante la partita (in metri per ora) per le diverse soglie, insieme al tempo trascorso (in percentuale) in ciascuna soglia, analizzando i maturatori precoci e tardivi nelle diverse categorie - Goto et al. (2019).

La maturità puberale dei giocatori è stata stimata utilizzando l'età cronologica al picco di PHV, calcolata tramite un'equazione basata su dati antropometrici (Philippaerts et al., 2006). I giocatori sono stati classificati in maturatori precoci, medi e tardivi in base all'età cronologica stimata al PHV: inferiore a 13 anni per i maturatori precoci, tra 13 e 15 anni per i maturatori medi, e superiore a 15 anni per i maturatori tardivi.

I risultati di questo studio hanno evidenziato che nelle categorie U9/U10, i giocatori considerati maturatori precoci, con un'età cronologica stimata al picco di PHV inferiore a 13 anni, hanno ricevuto più tempo di gioco rispetto ai maturatori tardivi, coprendo così una distanza totale significativamente maggiore durante le partite. In particolare, i maturatori precoci hanno percorso circa il 13% in più di distanza totale e hanno coperto maggiori distanze camminando e correndo a velocità moderata rispetto ai loro coetanei meno maturi.

Nel gruppo U13/U14, i maturatori precoci hanno mostrato una distanza percorsa a velocità elevata significativamente maggiore sia in termini assoluti (circa 56% in più) che relativi (circa 44% in più) rispetto ai maturatori tardivi. Inoltre, hanno trascorso una percentuale maggiore di

tempo correndo a velocità elevata durante la partita (3,5% rispetto al 2,5% dei maturatori tardivi).

Questi risultati evidenziano che i giocatori con una maturità biologica avanzata tendono a registrare prestazioni superiori in termini di distanza percorsa e tempo trascorso a correre a velocità elevata, in particolare nelle categorie più giovani (U9/U10) e intermedie (U13/U14).

Le implicazioni di questi risultati sono significative per il processo di selezione e sviluppo dei giovani calciatori. La sottorappresentazione dei maturatori tardivi e le minori opportunità di gioco per questi atleti suggeriscono che il processo di selezione potrebbe essere influenzato dalla maturità biologica, rischiando di escludere giocatori talentuosi che maturano più tardi. I maturatori precoci, pur avendo un vantaggio iniziale, potrebbero non continuare a progredire allo stesso ritmo, essendo vicini al loro massimo potenziale. Al contrario, i maturatori tardivi, se adeguatamente supportati, potrebbero raggiungere e superare i precoci nel lungo termine. È quindi cruciale che gli allenatori siano consapevoli dell'impatto della maturità biologica sulle prestazioni e sul tempo di gioco, e promuovano un'equa distribuzione delle opportunità. In particolare, per i gruppi di età tra i 13 e i 14 anni, è consigliabile che l'attenzione degli allenatori si concentri maggiormente sugli aspetti tecnici e sulla comprensione tattica, piuttosto che esclusivamente sulle capacità fisiche, tenendo conto della maturità biologica nel processo di identificazione e sviluppo dei talenti.

La preferenza per giocatori più avanzati biologicamente potrebbe essere influenzata dal fatto che, nel calcio professionistico di alto livello, le squadre che raggiungono le posizioni più alte in classifica tendono a mostrare qualità fisiche superiori, come una maggiore capacità aerobica, maggiore forza nello squat, migliori prestazioni negli sprint ripetuti e nei test di salto (Wing et al., 2020). Tuttavia, questo approccio potrebbe rappresentare un bias, poiché la selezione basata unicamente sulle capacità fisiche deve essere contestualizzata, in particolare allo stadio puberale. Oltre agli aspetti fisici, è essenziale considerare anche le abilità tecniche, che sono fondamentali per il successo nel calcio. Indicatori chiave di prestazione (KPI), come la precisione e il successo nei passaggi, sono vitali e potrebbero non essere influenzati dal miglioramento della forma fisica.

Wing et al. (2020) hanno condotto un'indagine per approfondire l'impatto della forma fisica sulla prestazione specifica del calcio, con particolare attenzione a come i test di fitness e le prestazioni durante le partite siano collegati a indicatori chiave di prestazione (KPI) come passaggi, tiri, contrasti, e dribbling (Figura 21).

Key performance indicator definitions.	
Parameter	Definition
Passing	An intentional played ball from one player to another. A completed pass is one received by a player on the same team as the passer.
Heading	Where 2 players challenge in the air against each other. For inclusion within the present study, both players must have left the ground in an attempt to win the ball. The player who heads the ball is deemed to have won the duel.
Tackling	A tackle is defined where a player makes contact with the ball in a "ground challenge." If the ball is taken away from their opponent, it is regarded as a successful tackle.
Shooting	Any attempt either head or strike that is aimed toward the goal. A shot on target is classified as a goal or any shot that would have gone in if it was not for the intervention of an opposition player.
Dribbling	An attempt by a player to beat an opponent while in possession of the ball. A successful dribble is classified as when a player beats an opponent and retains possession.

Figura 21-Indicatori chiave di prestazione (KPI) - Wing et al. (2020)

La ricerca di Wing et al. (2020) hanno evidenziato che la capacità di saltare più in alto, misurata attraverso lo squat jump (SJ) ed il CMJ, è strettamente legata al successo nei colpi di testa. Questo suggerisce che i giocatori che possono generare più forza esplosiva con le gambe hanno un vantaggio significativo nei duelli aerei, indipendentemente dalla loro altezza.

Inoltre, la forza massima delle gambe (1RM), calcolata indirettamente dal test di tre ripetizioni massime (3RM), si è dimostrata correlata al successo nei contrasti, specialmente per gli attaccanti. Questo indica che una maggiore forza delle gambe aiuta i giocatori a vincere i contrasti fisici, una componente cruciale per il possesso palla e la creazione di opportunità offensive.

Le implicazioni dei risultati suggeriscono che, mentre l'allenamento della forza e della potenza è fondamentale per migliorare le prestazioni nei colpi di testa e nei contrasti, non si può fare affidamento esclusivamente su questi parametri per migliorare altre abilità calcistiche; evidenziando che il successo negli altri KPI dipende probabilmente da una combinazione di abilità motorie avanzate, funzione cognitiva e abilità sensoriali motorie. Questo suggerisce un approccio multidimensionale all'allenamento, in cui la preparazione fisica è solo una parte di un insieme più ampio di fattori che determinano le prestazioni di un giocatore.

Anche Vaeyens et al. (2006) hanno evidenziato che lo stato di maturità biologica, misurato come la differenza tra età scheletrica ed età cronologica, ha un impatto significativo su vari aspetti delle capacità fisiche e tecniche dei giovani calciatori. Nello studio longitudinale di 5 anni del Progetto Ghent per il Calcio Giovanile (GYSP), che ha coinvolto 232 giovani calciatori, sono stati esaminati giocatori elite, sub-elite e non-elite attraverso una serie di test fisici e tecnici. I

risultati hanno mostrato che i calciatori con una maturità biologica avanzata tendevano a ottenere risultati superiori in variabili come forza, potenza, velocità e resistenza, specialmente nei gruppi U14-U16. I giocatori elite e sub-elite hanno dimostrato migliori capacità funzionali, come la forza nella sospensione a braccia piegate e la potenza nel salto verticale, oltre a superiori capacità di velocità e resistenza cardiorespiratoria rispetto ai non-elite. Anche le abilità tecniche, come il dribbling, i lob e la giocoleria, hanno mostrato una correlazione positiva con la maturità biologica, con i giocatori elite che hanno registrato prestazioni superiori nei test tecnici rispetto ai non-elite. Le analisi discriminanti hanno rivelato che le variabili più determinanti per discriminare i livelli di abilità nei gruppi U13 e U14 erano il dribbling, lo sprint a navetta, la resistenza e la velocità, mentre nei gruppi U15 e U16, l'ESHR (corsa navetta di resistenza) è emerso come il fattore discriminante più rilevante, insieme alle competenze tecniche e di velocità. Questi risultati suggeriscono che la maturità biologica deve essere considerata attentamente nel processo di selezione e sviluppo dei giovani calciatori. Inoltre, la variabilità tra le diverse categorie di età indica che le esigenze fisiologiche del calcio cambiano durante l'adolescenza, richiedendo una modulazione specifica dell'allenamento. Vaeyens et al. (2006) hanno sottolineato quattro principi chiave per il raggiungimento dell'eccellenza atletica: obiettivi e metodi di allenamento a lungo termine, un supporto ampio e coerente basato su una chiara filosofia, un'attenzione prioritaria allo sviluppo adeguato piuttosto che alla selezione precoce, e un focus sullo sviluppo individualizzato.

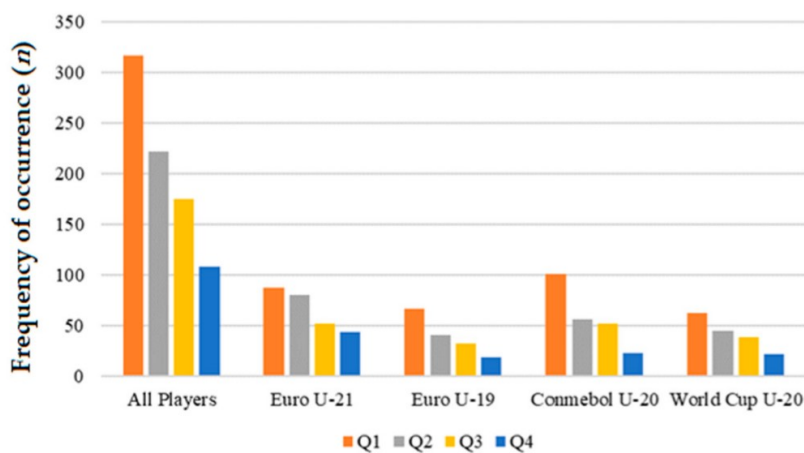
Un ulteriore aspetto cruciale da considerare in questo contesto è il RAE, che aggiunge una dimensione significativa all'influenza della maturità puberale sulle prestazioni calcistiche.

Lo studio di Pérez-González et al. (2020) si concentra sull'analisi del RAE nei principali campionati internazionali giovanili di calcio maschile, con l'obiettivo di comprendere come questo bias influenzi la selezione dei talenti e la rappresentanza dei giocatori in base al mese di nascita. Lo studio cerca di evidenziare se questo effetto crea un'ingiusta distribuzione delle opportunità per i giovani calciatori, potenzialmente condizionando la qualità del talento selezionato nei campionati d'élite. I dati sono stati raccolti dalle competizioni ufficiali UEFA e FIFA, comprendendo i campionati UEFA European Under-21 (2017-2019), UEFA European Under-19 (2019), il Campionato Sudamericano di Calcio Giovanile Conmebol U-20 (2019) e la Coppa del Mondo FIFA U-20 (2019).

I risultati hanno mostrato una predominanza di giocatori nati nel primo quartile dell'anno (Q1: gennaio-marzo), con una distribuzione decrescente man mano che ci si avvicina all'ultimo quartile (Q4: ottobre-dicembre) (Figura 22). Questo trend è coerente in tutti i campionati

analizzati, indicando che i giocatori nati nei primi mesi dell'anno hanno maggiori probabilità di essere selezionati. L'analisi della regressione di Poisson, utilizzata per valutare la frequenza delle nascite in relazione alla posizione nel calendario annuale, ha confermato un RAE significativo ( $p < 0,001$ ) per tutti i campionati presi in esame. Peraltro, la presenza del RAE è stata uniforme tra i campionati UEFA e FIFA analizzati, confermando che l'effetto non è limitato a una specifica regione geografica, ma rappresenta un fenomeno globale.

L'effetto RAE è emerso con particolare evidenza in specifiche posizioni sul campo, risultando significativo per i difensori nei campionati UEFA European Under-19, Conmebol U-20 e FIFA U-20 World Cup; per i centrocampisti nei campionati UEFA European Under-21, UEFA European Under-19 e Conmebol U-20; e per gli attaccanti nei tornei UEFA European Under-19, Conmebol U-20 e FIFA U-20 World Cup. Al contrario, il RAE non è stato significativo per i portieri, ad eccezione del torneo UEFA European Under-21, dove è stato rilevato un effetto significativo ( $p < 0,001$ ). Questo bias è principalmente dovuto alla pratica comune di dividere le categorie giovanili sulla base dell'anno di nascita, senza considerare le differenze nello sviluppo fisico e psicologico dei giocatori.



Quartile of birth of players by championship.

Figura 22– Distribuzione dei giocatori per quartili di nascita, suddivisi in base ai diversi campionati e al totale complessivo.

La recente metanalisi di Bozděch et al. (2023) ha esaminato come variabili quali genere, anno di nascita, posizione del giocatore, posizione geografica e livello di prestazione influenzino la magnitudine del RAE. Il campione totale analizzato comprendeva 2,741,911 calciatori, sia maschi che femmine, suddivisi in diverse fasce d'età (preadolescente, adolescente, post-adolescente e adulto) e categorie di prestazione (organizzazione sportiva, élite, rappresentanza).

I giocatori provenivano da diverse aree geografiche, con una forte rappresentanza dell'Europa. I risultati principali mostrano che l'effetto dell'età relativa è presente in modo significativo tra i calciatori, con la maggiore magnitudine del RAE osservata durante il periodo adolescenziale. L'analisi ha rivelato una distribuzione delle date di nascita che segue una gerarchia  $Q1 > Q2 > Q3 > Q4$ , con una forte sovra rappresentazione di giocatori nati nel primo quartile. Le ipotesi sono state in gran parte supportate: il RAE è risultato più pronunciato tra i maschi, nei livelli di prestazione più alti, e durante l'adolescenza.

Se volessimo considerare solo i TOP TEAM, Yagüe et al. (2018) hanno svolto un'indagine su 5201 calciatori professionisti maschi distribuiti in 178 squadre delle dieci migliori leghe della UEFA. Le leghe analizzate comprendevano Premier League (Inghilterra), Ligue 1 (Francia), Liga Santander (Spagna), Bundesliga (Germania), Serie A (Italia), Primeira Liga (Portogallo), Eerste Klasse A (Belgio), Süper Lig (Turchia), Bundesliga (Austria) ed Eredivisie (Olanda). L'obiettivo del documento è verificare se il RAE è presente tra i calciatori professionisti, esplorando anche le possibili differenze e correlazioni tra il RAE, la posizione dei giocatori in campo e la loro classificazione finale all'interno delle squadre.

L'analisi dettagliata delle leghe rivela che il RAE è particolarmente marcato in Serie A (Italia), con un effetto di grande entità (Cramer's  $V = 0,30$ ), mentre leghe come la Liga Santander (Spagna), la Bundesliga (Germania) e la SüperLig (Turchia) mostrano un effetto di media entità. Un'eccezione significativa è rappresentata dalla Eerste Klasse A (Belgio), dove la distribuzione dei giocatori tra i quartili è relativamente uniforme e non presenta differenze significative.

Inoltre, il RAE influenza significativamente la distribuzione dei giocatori in base alla loro posizione in campo, con un effetto maggiore tra i centrocampisti (Cramer's  $V = 0,23$ ) e un effetto moderato tra i portieri (Cramer's  $V = 0,18$ ) e i difensori (Cramer's  $V = 0,19$ ). Anche la classificazione delle squadre nelle rispettive leghe è associata all'RAE, con una sovrarappresentazione dei giocatori nati in Q1 indipendentemente dalla posizione in classifica delle squadre, sebbene l'effetto sia leggermente meno pronunciato nelle squadre di metà classifica.

Deprez et al. (2013) hanno indagato come la data di nascita influenzi non solo il processo di selezione, ma anche le prestazioni fisiche e la maturità biologica nei giovani atleti. Analizzando un campione di 374 calciatori belgi di élite, i giocatori sono stati suddivisi in base al trimestre di nascita, e sono stati esaminati parametri come altezza, peso, età al picco di velocità di crescita (APHV, calcolata utilizzando le variabili antropometriche descritte da Mirwald) e le prestazioni nei test anaerobici. Nello specifico, la prestazione anaerobica era descritta tramite i test di salto

in lungo da fermo (SBJ), CMJ e sprint sui 5 e 30 metri. I dati sono stati raccolti in diversi periodi di test su un arco di cinque anni.

Il campione dello studio, costituito da giovani calciatori d'élite belgi di età compresa tra 10,6 e 16,6 anni, è stato suddiviso in tre categorie di età: U13, U15 e U17, e ulteriormente raggruppato in base al trimestre di nascita. È stata osservata una sovrarappresentazione di giocatori nati nel primo trimestre (BQ1: 42,3%) rispetto al quarto trimestre (BQ4: 13,7%), tendenza evidente in tutte le fasce d'età. Nonostante questa distribuzione sbilanciata, non sono state riscontrate differenze significative nelle variabili antropometriche, come altezza e peso, tra i trimestri, ad eccezione dell'altezza nel gruppo U15, dove i giocatori nati nel secondo e terzo trimestre risultavano significativamente più alti rispetto a quelli del quarto trimestre. Inoltre, non sono emerse differenze significative nelle prestazioni anaerobiche (salto verticale, salto in lungo e sprint) tra i diversi trimestri di nascita.

Questo significa che, nonostante il RAE influisca sulla selezione, non ci sono prove, in questo studio di Deprez et al. (2013), che i giocatori nati prima nell'anno siano fisicamente superiori rispetto a quelli nati più tardi. Anzi, in alcuni casi, i giocatori nati più tardi che avevano raggiunto una maturità biologica precoce riuscivano a compensare il loro svantaggio cronologico. Le implicazioni di questi risultati sono significative per i programmi di identificazione e sviluppo del talento.

Se i giovani giocatori nati nei primi mesi dell'anno vengono favoriti, c'è il rischio che talenti potenzialmente eccellenti nati più tardi vengano trascurati o non abbiano accesso alle stesse opportunità di sviluppo. Di conseguenza, alcuni giocatori potrebbero abbandonare lo sport o non riuscire a esprimere il loro pieno potenziale, semplicemente a causa della loro data di nascita, che li colloca in una posizione svantaggiata rispetto ai coetanei.

Una riflessione naturale a questo punto è: chi matura prima ha davvero maggiori probabilità di raggiungere il calcio di alto livello rispetto a chi matura più tardi?

È quello che si sono chiesti Ostojic et al. (2014) conducendo uno studio di coorte prospettico per seguire un gruppo di giovani calciatori per un periodo di otto anni, valutando il loro stato di maturazione a 14 anni e il loro approdo nel calcio d'élite da adulti.

I risultati supportano l'ipotesi formulata nello studio: i calciatori che maturano tardivamente sono meno prevalenti tra i quattordicenni di successo, ma, nel lungo termine, hanno maggiori probabilità di raggiungere il livello d'élite nel calcio rispetto ai maturatori precoci.

Ostojic et al. (2014) espongono che i ragazzi che maturano precocemente tendono a essere favoriti nella selezione giovanile a causa della loro superiorità fisica, ma questo vantaggio non

si traduce necessariamente in un successo a lungo termine nel calcio d'élite. Al contrario, i ragazzi che maturano tardivamente possono sviluppare altre abilità, come l'agilità, le capacità tecniche e la forza mentale, che li rendono più competitivi una volta che raggiungono la maturità fisica.

In sintesi, mentre la maturazione precoce può offrire un vantaggio iniziale, è la maturazione tardiva che sembra essere più correlata al successo nel calcio d'élite. Questo studio sottolinea l'importanza di un approccio più equilibrato e inclusivo nella selezione e nello sviluppo dei giovani calciatori, con un focus non solo sulle abilità fisiche immediate, ma anche sul potenziale a lungo termine.

Anche Heilmann et al. (2024) hanno investigato il RAE nel calcio giovanile tedesco, con particolare attenzione alle squadre della Youth Bundesliga A (gennaio 2004 - dicembre 2005) e B (gennaio 2006 - dicembre 2007), nonché ai giocatori della terza divisione. I dati sono stati raccolti dal database Transfermarkt.de e includevano le date di nascita di 3,174 giocatori. Le ipotesi dello studio, secondo cui il RAE è presente nelle categorie giovanili e tende a diminuire con l'aumento dell'età e del livello di competizione, sono state supportate dai risultati.

Heilmann et al. (2024) spiegano questi risultati suggerendo che i giocatori nati nei primi mesi dell'anno beneficiano di un vantaggio iniziale, che si traduce in una maggiore probabilità di essere selezionati e sviluppati nei livelli giovanili. Tuttavia, con l'avanzare dell'età, questi vantaggi tendono a ridursi, permettendo anche ai giocatori nati più tardi nell'anno di emergere e competere a livelli più alti.

Una nota curiosa e di natura culturale è il riferimento da parte degli autori a tre effetti psicologici che influenzano profondamente il processo di sviluppo del talento sportivo: il Matthew Effect, il Pygmalion Effect e il Galatea Effect. Questi effetti, ciascuno con radici in concetti storici e mitologici, offrono una chiave di lettura interessante per comprendere come il RAE possa condizionare la crescita e la carriera degli atleti.

Il Matthew Effect prende il nome dal Vangelo di Matteo nella Bibbia, dove si afferma: "A chi ha sarà dato, e sarà nell'abbondanza; ma a chi non ha sarà tolto anche quello che ha." In relazione all'effetto RAE, questo concetto si applica agli atleti nati all'inizio dell'anno, che tendono a essere fisicamente più maturi rispetto ai loro coetanei nati più tardi. Questa maturità fisica li rende più propensi a essere selezionati per squadre avanzate e programmi di allenamento, offrendo loro accesso precoce a risorse e opportunità superiori. Di conseguenza, si innesca un ciclo auto-rinforzante in cui i giocatori più maturi continuano a progredire, mentre quelli nati più tardi possono essere esclusi o abbandonare lo sport per mancanza di opportunità.

Il Pygmalion Effect, noto anche come effetto Rosenthal (1963), deriva dalla mitologia greca, in cui lo scultore Pygmalion si innamora di una statua da lui creata, che poi prende vita. In psicologia, questo effetto si riferisce al fenomeno per cui le aspettative elevate da parte di insegnanti, allenatori o altre figure autoritarie possono migliorare le prestazioni di un individuo. In relazione al RAE, gli allenatori e gli scout tendono ad avere aspettative più elevate nei confronti di atleti che maturano precocemente, trascurando il potenziale a lungo termine di chi matura più tardi. Questo aumento delle aspettative si traduce in maggiore fiducia e motivazione per i maturatori precoci, creando un ciclo in cui le aspettative elevate portano a prestazioni migliori, che a loro volta rafforzano ulteriormente le aspettative.

Il Galatea Effect si riferisce a un fenomeno psicologico in cui le convinzioni e la fiducia in se stessi di un individuo influenzano le sue prestazioni. Se una persona crede di essere capace di raggiungere un certo obiettivo, è più probabile che vi riesca. Questo effetto è strettamente legato al concetto di autoefficacia. Nel contesto del RAE, se vengono incoraggiati principalmente gli atleti avvantaggiati da uno sviluppo precoce, si può creare un ambiente sfavorevole all'apprendimento e alla motivazione per coloro che maturano più tardi, ostacolando il loro sviluppo e riducendo le loro opportunità di successo.

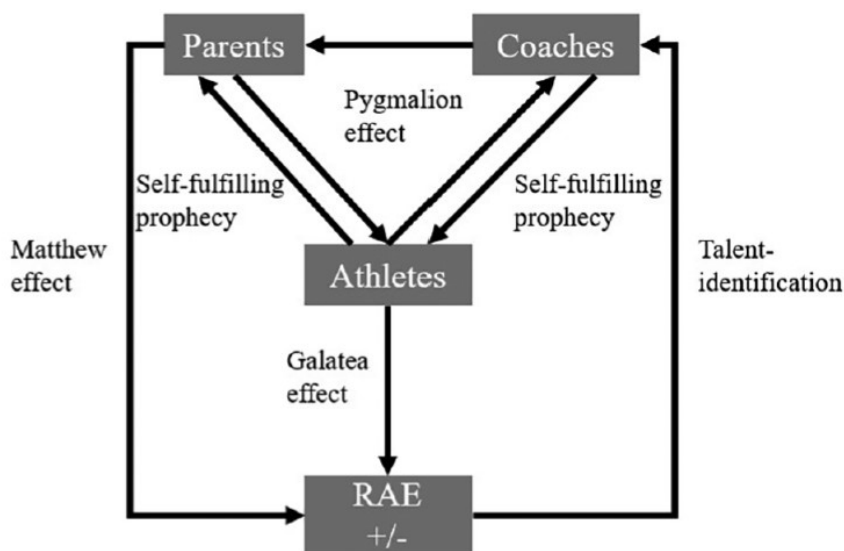


Figura 23– Heilmann et al. (2024)

Un modello concettuale (Figura 23) che mostra le influenze sullo sviluppo degli atleti, evidenziando l'effetto Pygmalion, la profezia che si autoavvera, l'effetto Galatea, l'effetto

Matthew e l'identificazione del talento. Genitori e allenatori modellano le percezioni e le prestazioni degli atleti, influenzando il RAE.

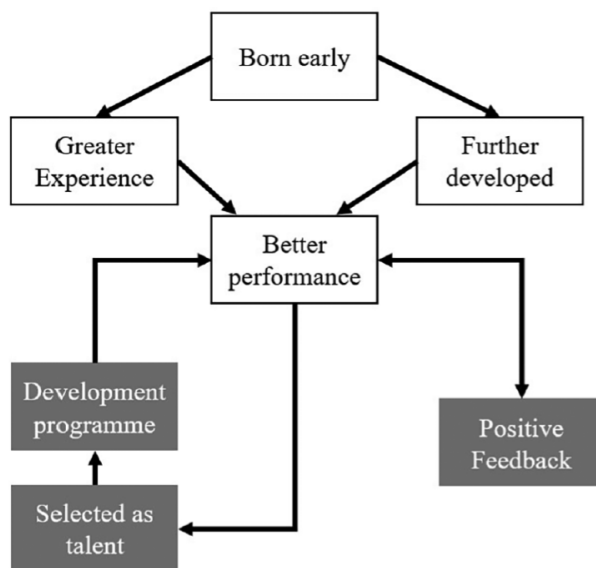


Figura 24– Heilmann et al. (2024)

Un modello (Figura 24) che illustra come essere nati all'inizio del periodo di selezione possa portare a una maggiore esperienza e ulteriore sviluppo, risultando in prestazioni migliori. Queste prestazioni migliorate portano a feedback positivi e alla selezione in programmi di sviluppo, rafforzando il riconoscimento dell'atleta come talento.

Brustio et al. (2024) hanno esaminato l'influenza del RAE sul passaggio dai livelli giovanili (U17, U19, U21) alle squadre senior nelle principali nazioni calcistiche europee, inclusi Inghilterra, Francia, Germania, Italia e Spagna. Lo studio ha analizzato un ampio campione di 9,527 calciatori maschili appartenenti alle squadre nazionali di questi paesi, coprendo un periodo di vent'anni, dal 2002 al 2022. I dati raccolti comprendono giocatori delle categorie U17, U19, U21 e Senior, permettendo una valutazione approfondita delle dinamiche di transizione tra queste fasce d'età. Questo approccio ha consentito di esplorare come il RAE influenzi la probabilità di successo nella progressione ai livelli più alti del calcio nazionale.

I risultati del presente studio evidenziano come il RAE influenzi significativamente i tassi di transizione dai livelli giovanili a quelli senior nelle nazionali maschili di calcio di Inghilterra, Francia, Germania, Italia e Spagna. In particolare, meno del 15% dei giocatori selezionati nelle squadre U17, e meno del 25% degli U19, è riuscito a raggiungere la squadra senior, con una leggera crescita fino a circa il 40% per i giocatori U21. Questa tendenza indica che la selezione

a livello giovanile non garantisce un passaggio di successo al livello senior, ma è comunque un indicatore parziale della possibilità di raggiungere tale livello. In termini di tassi di transizione dai livelli giovanili a quello senior, Inghilterra e Spagna emergono come le nazioni con i tassi di successo più elevati, rispettivamente con il 23,3% e il 24,9% dei giocatori giovanili che riescono a raggiungere la squadra senior. Al contrario, Germania, Italia e Francia presentano tassi di transizione inferiori, con la Germania al 18,5%, l'Italia al 16,6% e la Francia al 15,1%. Questi dati suggeriscono una variabilità significativa nell'efficacia dei sistemi di sviluppo giovanile tra queste nazioni.

Inoltre, il RAE è stato riscontrato in tutte le posizioni di gioco e a tutti i livelli giovanili, con una prevalenza maggiore nei giocatori nati nel primo trimestre dell'anno (Q1). Tuttavia, i risultati hanno mostrato che, mentre il RAE diminuisce con l'età, esso persiste ancora a livello senior in alcune nazionali. In particolare, Inghilterra, Italia e Spagna mostrano la persistenza del RAE anche a livello senior, indicando che i giocatori relativamente più anziani (nati nel primo quartile dell'anno) continuano a essere sovrarappresentati anche nelle squadre nazionali maggiori. In Francia e Germania, invece, questo effetto si attenua significativamente o è addirittura assente a livello senior, suggerendo che queste nazioni potrebbero avere politiche di selezione più equilibrate che riducono l'impatto del RAE con l'avanzare dell'età dei giocatori. Curiosamente, è emerso che i giocatori nati nell'ultimo trimestre dell'anno (Q4) hanno mostrato una maggiore probabilità di transizione al livello senior rispetto ai coetanei nati nel Q1, soprattutto nei livelli U17 e U19, suggerendo un'inversione del vantaggio relativo che avvantaggia i giocatori più giovani nel lungo termine. Questi risultati indicano che, sebbene il RAE favorisca i giocatori relativamente più anziani nelle prime fasi della carriera, i giocatori relativamente più giovani, che affrontano maggiori sfide, possono sviluppare competenze che li avvantaggiano nella transizione verso il livello senior. Gli autori suggeriscono di implementare politiche di selezione che riducano l'influenza del RAE, come la rotazione dei cut-off annuali o la creazione di squadre differenziate per quartile di nascita.

Distribuzione della frequenza dei tassi di transizione di successo per quartile di nascita nei giocatori delle categorie giovanili U17, U19 e U21. (Figura 25)

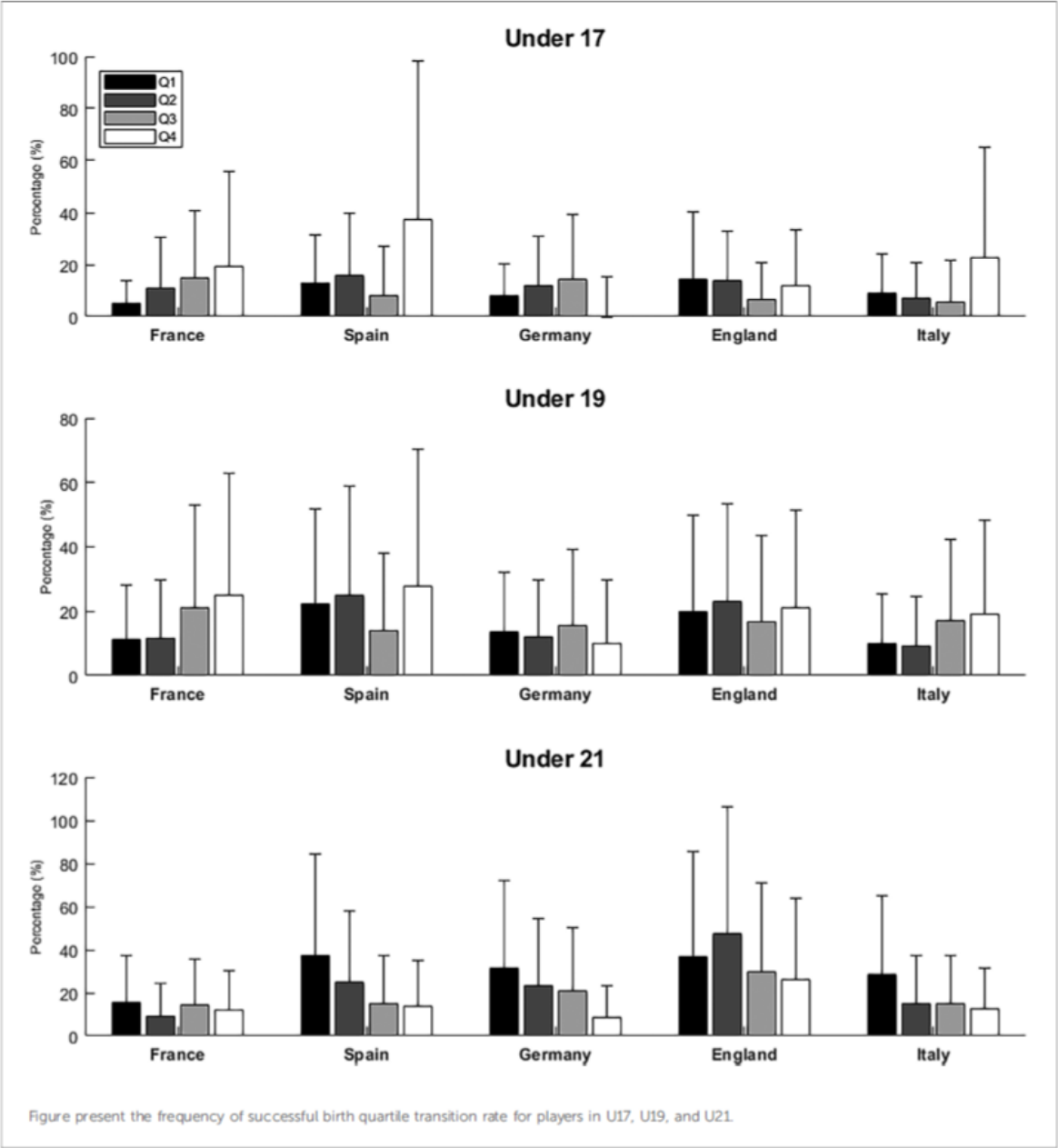


Figura 25- Brustio et al. (2024)

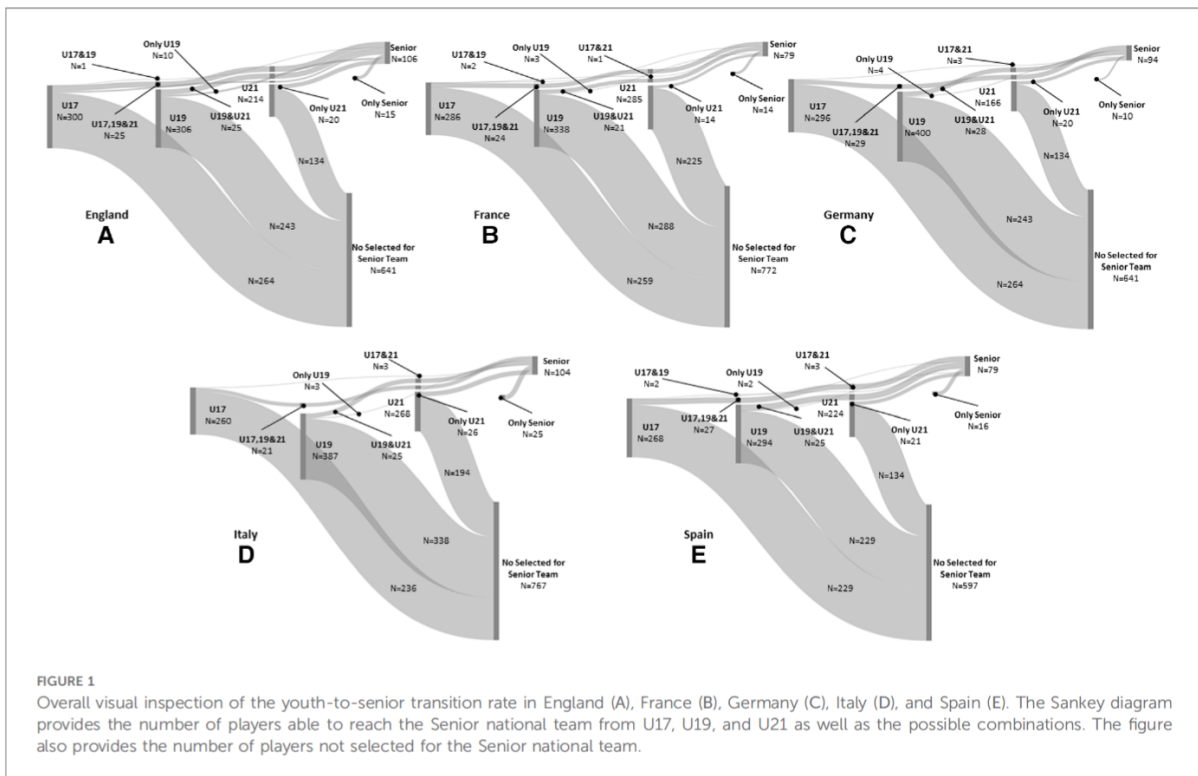


Figura 26- Ispezione visiva complessiva del tasso di transizione dal settore giovanile a quello senior in Inghilterra (A), Francia (B), Germania (C), Italia (D) e Spagna (E) - Brustio et al. (2024)

La figura 26 mostra il numero di giocatori che riescono a raggiungere la squadra nazionale Senior partendo dalle categorie U17, U19 e U21, così come le possibili combinazioni di transizione. L'analisi è particolarmente significativa per comprendere l'influenza del RAE sulla probabilità di transizione, con un focus sull'aumento della probabilità di transizione per i giocatori nati nel quarto quartile rispetto a quelli nati nel primo quartile.

Un'ulteriore analisi interessante emerge dallo studio di Saavedra-García (2024) tra i calciatori nominati per il Pallone d'Oro, dal 1956 al 2023. L'obiettivo dello studio era determinare se il RAE abbia influenzato in modo significativo le nomination per questo prestigioso premio e analizzare come tale effetto si sia evoluto nel tempo.

I risultati hanno mostrato un RAE significativo tra i giocatori nominati, con una sovrarappresentazione di calciatori nati nel primo trimestre dell'anno (Q1) rispetto agli ultimi trimestri, confermando un vantaggio per i giocatori relativamente più anziani durante le prime fasi della carriera.

Tuttavia, quando si considerano i Top 10, Top 3 e i vincitori del Pallone d'Oro, l'effetto dell'età relativa diventa trascurabile. Tra i vincitori e finalisti, non si osserva la stessa sovrarappresentazione di nati nel primo trimestre. Le analisi statistiche, incluse il test del chi-quadrato e i residui standardizzati, indicano che non vi è alcuna differenza significativa nella distribuzione delle date di nascita tra i giocatori di vertice. Questo suggerisce che, sebbene il RAE possa influenzare le fasi iniziali della carriera di un calciatore, non determina necessariamente il successo ai livelli più alti.

In sintesi, mentre il RAE ha un impatto significativo sulle nomination al Pallone d'Oro, non sembra influenzare in modo rilevante i migliori giocatori o i vincitori del premio, indicando che altri fattori entrano in gioco nel raggiungimento delle posizioni di vertice.

Il bio-banding è un concetto innovativo utilizzato negli sport giovanili per affrontare un problema comune: la grande variabilità fisica tra i giovani atleti che, pur avendo la stessa età cronologica, si trovano in fasi diverse del loro sviluppo biologico (Riddell, 2008; Cumming et al., 2017; Malina et al., 2019; Romann et al., 2020). In questo contesto, il bio-banding emerge come una strategia per livellare il campo di gioco e si basa sulla valutazione della maturità biologica, che può essere stimata attraverso metodi non invasivi come la percentuale dell'altezza adulta prevista o l'offset della maturità (tempo rispetto al picco di velocità di crescita, PHV). (Cumming et al., 2017)

Come evidenziato da Malina et al. (2019), il bio-banding è un metodo che raggruppa i giovani atleti in base alla loro maturità biologica, invece di utilizzare l'età cronologica come unico criterio. In pratica, invece di mettere insieme tutti i ragazzi di 13 anni in una competizione, il bio-banding suddivide questi atleti in gruppi in base al loro stato di sviluppo fisico. Questo significa che, indipendentemente dall'età anagrafica, i giovani che hanno una struttura fisica simile competono tra loro, creando un contesto più equilibrato e competitivo.

Il bio-banding viene calcolato utilizzando come indicatore principale lo stato di maturità biologica dei giovani atleti, nello studio di Malina et al. (2019) viene espresso in termini di percentuale dell'altezza adulta prevista. Questa percentuale viene calcolata attraverso un modello predittivo, il metodo Khamis-Roche, che stima l'altezza adulta del soggetto senza richiedere radiografie o esami invasivi. Il modello utilizza i seguenti parametri per la previsione dell'altezza adulta: età cronologica, altezza attuale, peso attuale, altezza media dei genitori (ovvero la media delle altezze della madre e del padre biologico). Il metodo Khamis-Roche è specifico per sesso e si basa su dati longitudinali di individui di origine europea. L'altezza attuale del giovane atleta viene quindi espressa come una percentuale della sua altezza adulta

prevista, fornendo un indicatore dello stato di maturità biologica. I giovani vengono raggruppati in bande specifiche basate sulla percentuale dell'altezza adulta prevista, ad esempio,  $\geq 85,0\%$  e  $< 90,0\%$ , o  $\geq 90,0\%$  e  $< 95,0\%$  (Malina et al., 2019).

Sono stati utilizzati due approcci distinti per raggruppare i giocatori maschi in base alla percentuale dell'altezza adulta prevista. Il primo metodo, noto come Quartile Bio-banding (QBB), prevedeva il trasferimento dei giocatori appartenenti ai quartili estremi di maturità all'interno di un gruppo di età cronologica. In particolare, i giocatori più maturi venivano spostati in un gruppo di età superiore, mentre i meno maturi venivano inseriti in un gruppo di età inferiore. Ad esempio, i giocatori U13 con uno sviluppo più avanzato venivano spostati nel gruppo U14, mentre quelli meno maturi del gruppo U14 venivano retrocessi nel gruppo U13. La seconda strategia consisteva nel raggruppare i giocatori all'interno di una specifica banda di maturità, limitando la percentuale dell'altezza adulta prevista a un intervallo definito, compreso tra  $\geq 85,0\%$  e  $< 90,0\%$ . In entrambi i metodi, il bio-banding ha ridotto la variabilità legata allo stato di maturità biologica all'interno dei gruppi di età cronologica e ha minimizzato le differenze agli estremi del continuum di maturità (Malina et al., 2019).

Diversi studi hanno considerato le risposte dei giovani calciatori alle competizioni bio-banding. Questa strategia è stata testata in varie accademie della Premier League inglese (EPL) e negli Stati Uniti, mostrando risultati promettenti.

Un esempio rilevante citato da Malina et al. (2019) viene da quattro accademie della Premier League, dove i giocatori tra gli 11 e i 14 anni, con altezze comprese tra il 85% e il 90% della loro altezza adulta prevista, hanno partecipato a tre partite di calcio 11 contro 11 su un campo di dimensioni regolari. L'obiettivo di questi tornei sperimentali era quello di valutare come i giovani atleti avrebbero risposto a una competizione in cui gli avversari erano biologicamente simili. Sedici di questi giocatori hanno anche partecipato a gruppi di discussione per condividere le loro percezioni sull'esperienza. Dai feedback è emerso che i giocatori a maturazione precoce, cioè quelli che fisicamente si trovavano avanti rispetto ai loro coetanei, hanno trovato le partite meno impegnative dal punto di vista fisico rispetto alle competizioni basate sull'età cronologica. Tuttavia, questo li ha spinti a concentrarsi maggiormente sugli aspetti tecnici e tattici del gioco, dovendo affrontare avversari che non potevano dominare esclusivamente con la forza fisica. D'altra parte, i giocatori a maturazione tardiva hanno apprezzato l'opportunità di giocare con pari fisicamente simili, sfruttando al meglio le loro abilità tecniche e tattiche, spesso assumendo anche ruoli di leadership all'interno della squadra.

Anche le percezioni degli allenatori sono state considerate. Gli allenatori dei giocatori a maturazione precoce hanno notato che questi atleti, spesso abituati a dominare le partite grazie alla loro superiorità fisica, hanno dovuto adattare il loro stile di gioco in risposta a nuove sfide, sviluppando una maggiore consapevolezza tattica e lavorando di più sull'abilità tecnica. Al contrario, gli allenatori dei giocatori a maturazione tardiva hanno osservato che questi ultimi, non più svantaggiati dalla loro minor forza fisica, hanno potuto dimostrare le proprie abilità, emergendo come leader e mentor per i loro coetanei. Il processo di bio-banding, quindi, non solo ha ridotto la dipendenza dalla fisicità nelle partite, ma ha anche evidenziato la capacità dei giocatori di sviluppare competenze più equilibrate, focalizzandosi maggiormente su tecnica e tattica.

In un altro studio, sempre citato da Malina et al. (2019), tredici giocatori di 13-15 anni della Premier League sono stati confrontati in partite 11 contro 11, una basata sull'età cronologica e una basata sul bio-banding. Non sono state riscontrate differenze significative nell'intensità fisica (misurata attraverso la frequenza cardiaca) tra i due formati, ma le partite bio-banding hanno visto un aumento nel numero di passaggi, tocchi e tiri in porta. Questo suggerisce che, sebbene la fisicità non venga compromessa, l'enfasi posta su tattica e tecnica risulti più marcata nelle partite bio-banding.

Esperienze simili sono state riportate negli Stati Uniti, dove la US Soccer ha organizzato tornei bio-banding per quattro squadre maschili e quattro femminili (Bunce et al., 2018). Anche qui, i giocatori a maturazione precoce hanno descritto le partite come fisicamente più impegnative e formative, mentre quelli a maturazione tardiva hanno apprezzato la possibilità di sfruttare al meglio le proprie competenze tecniche. Entrambi i gruppi, maschili e femminili, hanno descritto queste competizioni come orientate più alla creatività e alla tecnica che alla fisicità, contribuendo a un ambiente di gioco meno stressante e più piacevole. Il fatto di poter competere con nuovi giocatori ha reso l'esperienza ancora più gratificante e motivante per i partecipanti.

Per quanto riguarda altre capacità, come la resistenza e l'agilità, i tardivi spesso performano meglio nei test di resistenza, mentre le abilità tecniche e tattiche non sembrano variare significativamente tra i diversi gruppi di maturità. (Malina et al., 2019) L'applicazione di nuove tecnologie, come il GPS e il software di analisi delle prestazioni, permetterà di esaminare l'impatto del bio-banding su indicatori di prestazione in partita, come la velocità di picco, la distanza percorsa a velocità elevata e il coinvolgimento in attività singole e ripetute ad alta intensità. (Cumming et al., 2017).

I benefici del considerare la performance atletica in relazione a standard specifici per età e maturità sono evidenziati da esempi come un calciatore di 12 anni a maturazione precoce (giocatore A) che, rispetto ai suoi coetanei, eccelle nei test di velocità, potenza, agilità e capacità aerobica. Tuttavia, quando confrontato con standard basati sullo stesso livello di maturazione biologica, il giocatore A risulta in linea con la media o addirittura inferiore in alcuni test, rivelando debolezze precedentemente non identificate. (Cumming et al., 2017).

Al contrario, un atleta a maturazione tardiva, che potrebbe non sembrare eccezionalmente veloce o forte rispetto ai coetanei, potrebbe ottenere una performance molto più favorevole se confrontata con atleti dello stesso livello di maturazione.

I dati mostrano che, nonostante il bio-banding riduca la variabilità fisica, esistono ancora differenze significative in altezza e peso all'interno delle bande. Ad esempio, nei giocatori di football americano e calcio, la maturazione scheletrica e le dimensioni corporee variano all'interno delle diverse bande, con i giocatori di football che tendono ad avere maggiore variabilità in termini di peso. Tuttavia, nelle bande superiori (post-PHV), i giocatori sono generalmente più omogenei in termini di età e maturità scheletrica. (Malina et al., 2019). Le previsioni che includono l'età scheletrica risultano generalmente più accurate rispetto a quelle che non la includono, evidenziando che la previsione dell'altezza adulta senza l'età scheletrica può introdurre errori in alcune fasce di maturità.

Tuttavia, per questi atleti, il bio-banding si è rivelato uno strumento efficace per affrontare le disparità fisiche legate alla maturazione nei giovani atleti, creando competizioni più equilibrate e favorendo lo sviluppo delle abilità tecniche e tattiche. Le esperienze riportate sia dai giocatori che dagli allenatori indicano che il bio-banding può fornire nuove opportunità di apprendimento, soprattutto per quei giocatori che, nelle competizioni basate sull'età cronologica, tendono a essere svantaggiati o a fare troppo affidamento sulle loro capacità fisiche.

Anche Romann et al. (2020) hanno investigato l'applicazione del bio-banding nel calcio giovanile. Per il bio-banding, i ricercatori hanno utilizzato il maturity offset (MO) e la percentuale dell'altezza adulta prevista, calcolati attraverso misurazioni antropometriche come peso corporeo, altezza in piedi e altezza seduta. Le formule per il calcolo del maturity offset e dell'età al PHV sono basate sui metodi descritti da Mirwald (2002) e Sherar (2005). Successivamente, i giocatori sono stati quindi suddivisi in base alla maturità biologica (MO) in due squadre: la squadra BA1 (con giocatori più giovani biologicamente, MO: -2,5 a -1,2 anni) e la squadra BA2 (giocatori più avanzati biologicamente, MO: -1,2 a 0,0 anni).

I dati fisici (Figura 27) mostrano che nelle partite bio-banding, le distanze percorse in jogging, corsa e corsa ad alta velocità erano significativamente ridotte rispetto alle partite giocate età cronologica. Tuttavia, non sono emerse differenze significative per le distanze percorse camminando o sprintando, né per la velocità di corsa massima o le accelerazioni massime. Dal punto di vista tecnico e tattico (Figura 28), le partite bio-banding hanno evidenziato un aumento significativo del numero di duelli ( $p = 0,024$ ) e dei calci piazzati ( $p = 0,025$ ), con una riduzione del tempo medio di possesso palla per azione ( $p = 0,021$ ). Anche il tasso di passaggi riusciti è stato inferiore nelle partite bio-banding rispetto alle partite giocate età cronologica ( $p < 0,001$ ), mentre il numero di passaggi non riusciti è stato maggiore ( $p < 0,001$ ). Nonostante queste differenze, il numero totale di passaggi effettuati non è cambiato significativamente tra i due contesti. Infine, si è osservata una tendenza verso una minore differenza nel possesso palla tra le squadre bio-banding, indicativa di un gioco più equilibrato. In sintesi, i risultati confermano che il bio-banding ha ridotto i vantaggi fisici dei giocatori a maturazione precoce, aumentando il coinvolgimento tattico e tecnico dei giocatori a maturazione tardiva. Questo approccio sembra favorire uno sviluppo più equilibrato delle abilità tecniche e tattiche, riducendo allo stesso tempo il carico fisico complessivo.

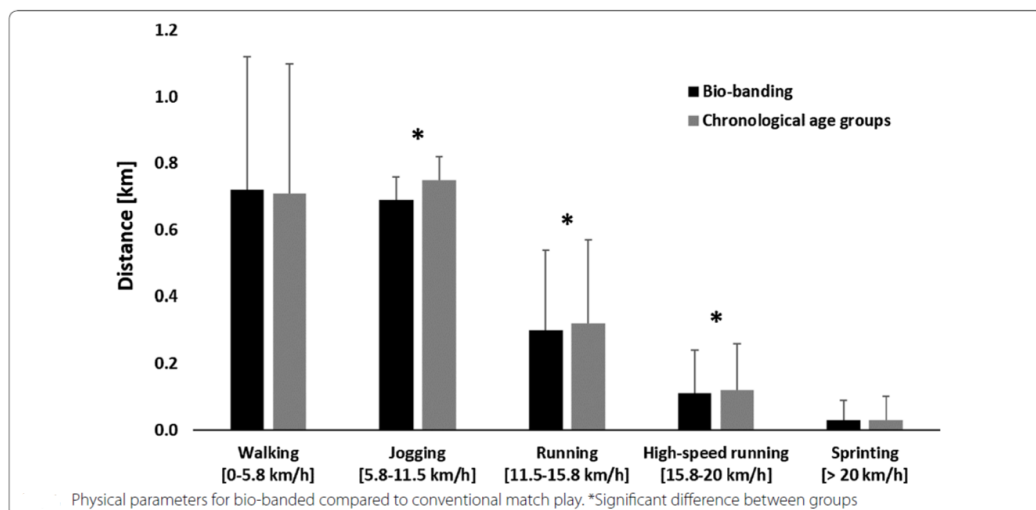


Figura 27– Dati fisici per le squadre suddivise per bio-banding ed età cronologica - Romann et al. (2020)

Parameter	BB	CA	p-value	95% CI	Cohen's d
Duels [n]	6.8 ± 3.4	4.4 ± 1.7	0.02	[0.4, 4.4]	0.89
Difference in ball possession between teams [% p.]	6.0 ± 16.0	18.8 ± 20.6	0.06	[- 26.1, 0.5]	0.69
Mean time of ball possession per action [s]	10.7 ± 2.7	12.4 ± 2.7	0.02	[- 3.0, - 0.3]	0.62
Changes in ball possession [n]	30.4 ± 8.3	26.3 ± 6.6	0.08	[- 0.5, 8.8]	0.55
Fouls [n]	1.1 ± 0.9	1.3 ± 1.3	0.57	[- 0.9, 0.5]	0.17
Set pieces [n]	10.3 ± 2.9	7.5 ± 2.6	0.03	[0.4, 5.1]	1.00
Shots [n]	3.4 ± 2.0	3.8 ± 1.8	0.53	[- 1.6, 0.9]	0.20
Successful goal attempts [%]	30.3 ± 38.6	25.6 ± 23.1	0.76	[- 14.6, 23.9]	0.15
Passes [n]	41.4 ± 7.5	40.6 ± 10.9	0.80	[- 6.2, 8.0]	0.09
Successful passes [%]	65.3 ± 8.2	74.5 ± 6.6	<0.01	[- 14.1, - 4.3]	1.23
Unsuccessful passes [%]	34.7 ± 8.2	25.5 ± 6.6	<0.01	[3.8, 14.6]	1.06

Figura 28- Dati tecnici per le squadre suddivise per bio-banding ed età cronologica - Romann et al. (2020)

Arede et al. (2024) hanno condotto uno studio crossover per valutare gli effetti del confronto tra competizioni basate sull'età cronologica e quelle basate sull'età biologica (bio-banding). Lo studio ha analizzato le prestazioni fisiche e il comportamento esplorativo spaziale di 116 calciatori maschi, di età compresa tra 13 e 14 anni, reclutati da cinque accademie calcistiche regionali in Portogallo, monitorando i giocatori durante partite di calcio 7v7. L'età biologica dei giocatori è stata stimata utilizzando la percentuale di altezza adulta prevista (%PAH), calcolata con l'equazione di Khamis e Roche (1994). Nelle partite basate sull'età biologica, i giocatori hanno coperto una distanza inferiore ( $p < 0,01$ ), eseguito un numero minore di decelerazioni ( $p < 0,05$ ) e si sono spostati a una velocità media più bassa ( $p < 0,01$ ) rispetto alle partite basate sull'età cronologica. Questi risultati suggeriscono una riduzione delle richieste fisiche durante i match di bio-banding. Inoltre, è stato osservato un numero minore di impatti corporei ( $p < 0,05$ ) e una frequenza cardiaca di picco (HRpeak) inferiore ( $p < 0,05$ ) durante le partite di bio-banding, indicando un carico fisico ridotto. Nonostante queste differenze significative nei parametri fisici, non sono state osservate differenze rilevanti nell'indice di esplorazione spaziale (SEI) tra i due formati di gioco ( $p > 0,05$ ), suggerendo che la capacità dei giocatori di esplorare lo spazio sul campo rimane costante indipendentemente dal formato di gioco.

Per concludere, il bio-banding è una strategia utile per gestire le differenze individuali in dimensioni, forza e potenza legate allo stato di maturità biologica. Tuttavia, non è una soluzione completa: riduce la variazione legata alla maturità, ma non la elimina del tutto. Le bande di maturità sono costrutti flessibili, che possono essere adattati in base al contesto specifico e alle necessità dei giocatori, consentendo periodicamente agli atleti di “giocare in alto” o “giocare in basso”. In definitiva, il bio-banding è un complemento ai gruppi basati sull'età cronologica,

piuttosto che un sostituto, ed è potenzialmente utile per identificare e sviluppare talenti, fornendo sfide adeguate ad atleti in diverse fasi di maturazione. Tuttavia, occorre prestare attenzione alla variazione etnica nei modelli di previsione dell'altezza, poiché i dati utilizzati per sviluppare le equazioni provengono da campioni americani di origine europea.

La percentuale di altezza adulta prevista è uno strumento utile per stimare lo stato di maturità biologica di un giovane atleta, ma presenta diverse limitazioni che ne riducono l'affidabilità (Cumming et al., 2017). Innanzitutto, questo metodo non tiene conto della velocità di crescita attuale, rendendo difficile individuare se l'atleta stia attraversando una fase di crescita accelerata (Cumming et al., 2017). La sua precisione dipende fortemente dall'accuratezza delle misurazioni di altezza e peso dei genitori e del giovane, ma queste possono essere soggette a errori, specialmente se i genitori sovrastimano la loro altezza (Cumming et al., 2017). Inoltre, le equazioni utilizzate per il calcolo dell'altezza adulta sono basate su campioni limitati, prevalentemente di origine europea e di livello socioeconomico elevato, rendendo il metodo potenzialmente meno adatto a individui di diverse etnie e contesti. Infine, la percentuale di altezza prevista non fornisce indicazioni precise sul momento in cui si verificheranno cambiamenti significativi come il PHV, limitando la sua utilità nella pianificazione dello sviluppo a lungo termine (Cumming et al., 2017).

Il maturity offset tenta di predire l'età del PHV (cioè, un indicatore dello stato di maturità: pre-PHV, circa-PHV o post-PHV), ma anch'esso ha limiti significativi. Le sue stime sono spesso imprecise, soprattutto per i ragazzi che maturano in anticipo o in ritardo (Cumming et al., 2017). In questi casi, l'età del PHV può essere sovrastimata o sottostimata, rendendo difficile ottenere una valutazione accurata della maturità (Cumming et al., 2017). Inoltre, il metodo tende a ridurre la variabilità nelle predizioni rispetto alla realtà, il che significa che potrebbe non cogliere completamente le differenze individuali nel momento in cui si verifica il PHV (Cumming et al., 2017). Questo strumento funziona bene solo per un gruppo ristretto di giovani a maturazione media, ma è meno affidabile per quelli che maturano molto presto o molto tardi. Anche le stime intra-individuali possono variare nel tempo, complicando ulteriormente la valutazione costante dello stato di maturità (Cumming et al., 2017).

A tal proposito, sebbene il bio-banding possa avere un impatto positivo sulle esperienze e sullo sviluppo dei giovani atleti, è fondamentale riconoscerne i limiti e che non rappresenta una soluzione definitiva. Il bio-banding dovrebbe essere parte integrante di un programma di sviluppo che consideri vari fattori e approcci in modo olistico.

Un "approccio ibrido" potrebbe includere competizioni di bio-banding con frequenza mensile o bimestrale, integrate nel programma di competizioni tradizionali basate sull'età. Questo metodo consentirebbe di mantenere i vantaggi delle competizioni basate sull'età, pur affrontandone le limitazioni. Inoltre, esporrebbe gli atleti a una varietà più ampia di sfide e situazioni di apprendimento, contribuendo a ottimizzare lo sviluppo atletico, l'acquisizione delle abilità e il benessere complessivo. Un approccio ibrido darebbe anche la possibilità agli allenatori e agli scout di valutare le capacità e il potenziale degli atleti in contesti di apprendimento diversificati.

#### 4.7 Effetti della maturità puberale sulla fatica e la capacità di recupero

Come abbiamo potuto apprendere nelle sezioni inerenti al metabolismo durante l'età puberale, i bambini e gli adolescenti presentano una fisiologia aerobica ben sviluppata che li rende più efficienti rispetto agli adulti nell'esecuzione di esercizi continui a bassa o moderata intensità. Tuttavia, essi hanno una minore capacità anaerobica rispetto agli adulti, che si riflette in una minore produzione di lattato muscolare durante l'esercizio ad alta intensità e in una minore capacità di utilizzare il glicogeno muscolare. Questo significa che i giovani hanno un vantaggio nel recupero dopo esercizi di alta intensità intermittente, poiché i loro livelli di acido lattico e il pH muscolare ritornano ai valori di riposo più rapidamente rispetto agli adulti.

Durante l'esercizio fisico, i giovani mostrano un uso preferenziale del metabolismo ossidativo rispetto a quello glicolitico (Boisseau et al., 2000). I livelli di fosfocreatina (PCr) e di ATP nei muscoli sono simili a quelli degli adulti, ma la loro capacità di produrre energia attraverso la glicolisi è ridotta a causa di una minore attività degli enzimi glicolitici come la fosfofruttochinasi e la lattato deidrogenasi (Boisseau et al., 2000). Questo limita la produzione di lattato muscolare e il conseguente accumulo di idrogenioni ( $H^+$ ), che causano l'abbassamento del pH muscolare. La minore accumulazione di acido lattico permette ai giovani di sostenere sforzi ripetuti con tempi di recupero più brevi rispetto agli adulti (Boisseau et al., 2000).

In generale, i giovani tendono a recuperare più rapidamente dagli esercizi ad alta intensità rispetto agli adulti (Boisseau et al., 2000). Questo è dovuto non solo alla minore produzione di lattato, ma anche a una serie di altri fattori, tra cui una minore attivazione del sistema nervoso simpatico durante gli sforzi massimali e una diversa distribuzione delle fibre muscolari (una maggiore proporzione di fibre lente di tipo I). La capacità di sostenere sforzi intermittenti con tempi di recupero più brevi può essere attribuita anche a una più rapida risintesi di PCr.

Sebbene i giovani abbiano una minore capacità di esercizio anaerobico rispetto agli adulti, essi sono più adatti a sostenere esercizi aerobici prolungati e a recuperare rapidamente dopo sforzi intermittenti (Armstrong et al., 2011). Tuttavia, la capacità di mantenere una velocità di corsa sopra l'80% della loro capacità aerobica massima migliora con l'età, rendendo gli adolescenti e gli adulti più efficienti nei compiti che richiedono un impegno superiore alla soglia lattacida (Armstrong et al., 2011).

Una delle caratteristiche dei bambini è che sono meno "economici" rispetto agli adolescenti e agli adulti durante la camminata e la corsa, il che significa che usano più energia per compiere gli stessi movimenti (Armstrong et al., 2011). Questa inefficienza è dovuta a una serie di fattori, tra cui una co-contrazione eccessiva dei muscoli antagonisti e una frequenza di passo più elevata. Inoltre, i bambini più piccoli hanno un controllo neuromotorio meno maturo, che si riflette in schemi di movimento meno coordinati e più variabili (Armstrong et al., 2011).

Nonostante la loro capacità aerobica inferiore rispetto agli adolescenti, i bambini tendono a recuperare più rapidamente dopo esercizi di alta intensità. Ratel et al. (2004;2006) hanno condotto una serie di studi su esercizi ad alta intensità intermittenti, dimostrando che l'output di potenza a breve termine e/o la velocità di corsa dipendono dall'età, dal modo di esercizio e dal tempo consentito per il recupero. Durante sprint ciclistici ripetuti, ad esempio, ragazzi di 10 anni sono stati in grado di mantenere il loro picco di potenza continua (CPP) con solo 30 secondi di recupero tra gli sprint, mentre adolescenti di 15 anni e uomini di 20 anni richiedevano 5 minuti di recupero per sostenere lo stesso livello di prestazione.

In un altro studio citato da Armstrong et al. (2011), durante 10 sprint massimali consecutivi con soli 15 secondi di recupero, i bambini hanno mostrato una riduzione minore nella potenza rispetto agli adulti. Questo suggerisce che i ragazzi sono meno soggetti a fatica muscolare e accumulano meno lattato nel sangue rispetto agli adulti. Inoltre, hanno una maggiore capacità di risintesi della fosfocreatina (PCr), un'importante fonte di energia per esercizi di breve durata e alta intensità, grazie a una maggiore attività ossidativa muscolare. Boisseau et Delamarche (2000) attraverso la risonanza magnetica con spettroscopia di fosforo (<sup>31</sup>P-MRS) hanno confermato che i ragazzi hanno una resistenza alla fatica superiore grazie a una rapida risintesi di PCr e una maggiore capacità ossidativa mitocondriale.

Le modalità di recupero nei giovani sono di particolare interesse per coloro che lavorano con atleti d'élite in età giovanile. Gli allenatori possono sfruttare la capacità dei giovani di recuperare rapidamente per pianificare sessioni di allenamento che includano sforzi ripetuti ad alta intensità con periodi di recupero relativamente brevi. Tuttavia, è importante tenere conto

delle differenze individuali legate alla maturazione biologica e all'età cronologica, poiché queste possono influenzare la capacità di recupero.

Nel calcio, una partita competitiva induce danni muscolari da esercizio (EIMD), dolori muscolari a insorgenza ritardata (DOMS), cambiamenti biochimici e alterazioni neuromuscolari. I calendari di partite congestionati possono comportare affaticamento residuo e una riduzione della performance nelle competizioni successive a causa di un recupero insufficiente. Comprendere i meccanismi di recupero in questi periodi è essenziale per bilanciare il carico di allenamento e il recupero, al fine di favorire gli adattamenti desiderati. Il recupero nei giocatori professionisti è influenzato da vari fattori, tra cui l'attività di corsa durante le partite, le caratteristiche fisiche dei giocatori e le strategie di recupero applicate post-competizione. Risulta quindi prioritario monitorare carichi di lavoro e lo stato di recupero per prevenire il sovrallenamento, e l'uso di tecniche moderne di recupero ha dimostrato effetti positivi sui calciatori d'élite. Tuttavia, l'applicazione delle stesse strategie nei giovani atleti richiede una valutazione distinta, poiché i giovani mostrano una resistenza alla fatica superiore e un recupero più rapido rispetto agli adulti, specialmente nei giocatori pre-PHV (pre-picco di crescita).

Calleja-González et al. (2021) hanno effettuato una revisione sistematica che ha esaminato le strategie di recupero nei giovani calciatori. I risultati evidenziano che le strategie di recupero influenzano significativamente la performance neuromuscolare e la capacità di recupero nei giovani atleti. Il danno muscolare indotto dalle contrazioni eccentriche può compromettere la produzione di forza, e lo stretching statico (SS) si è rivelato inefficace, mentre il recupero attivo (AR) e l'immersione in acqua fredda (CWI) hanno mostrato miglioramenti rispetto allo stretching statico (SS). Sia l'immersione in acqua fredda (CWI) che il recupero attivo (AR) hanno ridotto l'aumento della creatina chinasi (CK), un indicatore di danno muscolare, entro 48 ore, in misura maggiore rispetto allo stretching statico (SS). Tuttavia, i protocolli di immersione non hanno migliorato significativamente la performance nel CMJ, sebbene l'uso combinato di vibrazione corporea totale (WBV) e stretching statico (SS) abbia avuto effetti positivi sulla forza esplosiva. Le prestazioni di sprint ripetuti (RSA) indicano che 72 ore di recupero sono più efficaci rispetto a 24 ore. Nelle prestazioni di corsa durante la partita, CWI ha dimostrato di preservare la distanza percorsa e migliorare variabili come la velocità massima e il numero di sprint. Inoltre, il CWI ha ridotto la fatica e il DOMS, risultando particolarmente vantaggioso per i giocatori post-PHV. Nonostante ciò, nessuna strategia di immersione ha ridotto significativamente la risposta infiammatoria, misurata tramite citochine come IL-1b, IL-6 e IL-

10. Sul piano psicologico, il CWI e il AR hanno dimostrato di ridurre il DOMS e la percezione della fatica rispetto allo SS.

Fitzpatrick et al. (2021) hanno condotto uno studio con il fine di esplorare l'efficacia e l'affidabilità di vari metodi per monitorare la fatica nei giovani calciatori d'élite. In particolare, quali strumenti siano più utili e precisi nel misurare il livello di affaticamento fisico, con l'obiettivo di prevenire sovrallenamento e infortuni, mantenendo alte prestazioni durante il corso della stagione.

La ricerca è stata condotta su un gruppo di 17 giovani calciatori d'élite, tutti attivi nella Premier League Under 18 inglese. I partecipanti hanno svolto due sessioni di test a distanza di una settimana. Durante queste sessioni, sono stati utilizzati diversi strumenti per valutare la fatica: test di salto CMJ, un questionario di benessere soggettivo (per misurare come i giocatori si sentivano fisicamente e mentalmente), e un accelerometro triassiale, che ha registrato i movimenti dei giocatori durante una corsa submassimale. Questi test hanno permesso di raccogliere dati sia soggettivi che oggettivi sul livello di affaticamento. I risultati suggeriscono che i test di salto e le misurazioni accelerometriche triassiali durante la corsa submassimale sono strumenti affidabili per monitorare la fatica nei giovani calciatori d'élite. In particolare, il CMJ, lo Squat Jump (SJ) e il Drop Jump (DJ) hanno mostrato una buona affidabilità test-retest, con coefficienti di variazione (CV%) compresi tra il 4,5% e il 7,7%, e coefficienti di correlazione intraclassa (ICC) tra 0,80 e 0,88. Tuttavia, l'altezza del DJ (DJ-JH) ha mostrato un CV% di 6,0 e un ICC di 0,76, leggermente inferiore alla soglia accettabile di 0,80. Anche le misurazioni accelerometriche hanno mostrato buona affidabilità, fatta eccezione per la variabile PlayerLoad anteriore-posteriore (%PLAP), con un ICC di 0,63. Al contrario, i questionari di benessere soggettivo hanno evidenziato una scarsa affidabilità, con CV% superiori al 10% e ICC generalmente inferiori a 0,80, e una bassa coerenza interna ( $\alpha$  di Cronbach = 0,45). Pertanto, i questionari non dovrebbero essere utilizzati come unica misura del monitoraggio della fatica. Le misure con una buona affidabilità, come il CMJ, SJ e DJ, forniscono stime accurate delle prestazioni fisiche e potrebbero essere utilizzate settimanalmente per valutare la fatica neuromuscolare.

Anche Evans et al. (2022) hanno monitorato la fatica post-partita, durante una stagione competitiva, in 16 calciatori d'élite di età media di 18 anni, che partecipavano al campionato della English Football League Youth Alliance. L'analisi prospettica ha evidenziato associazioni significative tra le accelerazioni e decelerazioni registrate due giorni dopo la partita (MD+2) e l'energia percepita dai giocatori. Più elevate erano le accelerazioni e decelerazioni durante la

partita, maggiore era la riduzione dell'energia percepita nei giorni successivi, spiegando l'8% della variazione nell'energia percepita, il 9% nello stress e il 6% nel benessere totale. Ciò indica che le accelerazioni e le decelerazioni possono essere un valido indicatore della fatica post-partita. Inoltre, i dati raccolti cinque giorni prima della partita (MD-5) hanno mostrato che una buona performance nel CMJ era associata a un maggiore numero di accelerazioni e decelerazioni durante la partita, spiegando il 5% della variazione nelle accelerazioni e decelerazioni. Al contrario, lo stress, la bassa qualità del sonno e il benessere totale erano negativamente associati con le accelerazioni e decelerazioni durante la partita successiva, suggerendo che monitorare lo stato di benessere e i test fisici come il CMJ potrebbe aiutare a prevedere la capacità di accelerare e decelerare in partita, consentendo agli allenatori di ottimizzare carichi di allenamento e recupero.

## 5 Protocolli e consensi sull'allenamento in età evolutiva

L'allenamento sportivo per gli atleti in età evolutiva rappresenta una sfida complessa e multidimensionale, che richiede una valutazione attenta dei bisogni fisici, psicologici e sociali dei giovani atleti. Il concetto di sviluppo a lungo termine (Long-Term Athlete Development, LTAD) emerge come quadro teorico predominante per guidare la crescita e la maturazione degli atleti, rispettando le fasi critiche di adattamento ed allenabilità che si verificano durante l'infanzia e l'adolescenza (Balyi & Hamilton, 2004).

Il Comitato Olimpico Internazionale (CIO), con la sua dichiarazione di consenso del 2014 (IOC Consensus Statement, 2014), ha sottolineato l'importanza di un approccio unificato e basato sull'evidenza per lo sviluppo degli atleti giovani, considerando i numerosi fattori che influenzano la loro crescita fisica, la maturazione biologica e lo sviluppo comportamentale. Il CIO riconosce che lo sviluppo atletico è un processo complesso, influenzato da variabili genetiche e ambientali, e che non può essere completamente compreso attraverso l'uso esclusivo dell'età cronologica come indicatore di progresso. Questo ha portato all'introduzione di metodi più avanzati, come l'uso del PHV per monitorare e ottimizzare l'allenamento in relazione alle finestre critiche di sviluppo delle capacità fisiche e motorie.

La Commissione Medica del Comitato Olimpico Internazionale (IOC Consensus Statement, 2014) ha stabilito che la protezione della salute dell'atleta è l'obiettivo primario di ogni programma di allenamento, ponendo particolare attenzione alle esigenze degli atleti in età evolutiva. Questi giovani atleti, spesso definiti "atleti d'élite", possiedono talenti atletici superiori, ricevono un coaching esperto e sono esposti precocemente a competizioni ad alto livello. Tuttavia, come sottolinea la dichiarazione di consenso del CIO (2014), il loro sviluppo richiede protocolli che garantiscano un equilibrio tra prestazioni, sicurezza e benessere a lungo termine. È ormai noto che trattare i giovani atleti come "adulti in miniatura" è un errore metodologico (Balyi et al., 2005) che non tiene conto delle differenze biologiche e dello sviluppo individuale (Malina et al., 2013).

Oltre agli aspetti fisici, lo sviluppo psicologico ed emotivo degli atleti giovani è un'altra area critica da considerare. Come riportato nella dichiarazione di consenso del CIO, i giovani atleti d'élite spesso affrontano pressioni significative da parte di genitori, allenatori e organizzazioni sportive. Questo può portare a fenomeni di burnout, uso eccessivo e abbandono precoce dello sport, in particolare quando le aspettative di successo a breve termine prevalgono su un approccio sostenibile e orientato al lungo periodo (IOC Consensus Statement, 2014). La

promozione di un ambiente sportivo positivo, in cui l'accento sia posto sullo sviluppo delle competenze piuttosto che sui risultati immediati, è fondamentale per il benessere psicologico degli atleti giovani.

Il supporto psicologico è essenziale anche per prevenire l'abbandono sportivo. Uno studio condotto da Fraser-Thomas et al. (2008) hanno evidenziato che la pressione eccessiva per il successo precoce e le aspettative non realistiche contribuiscono significativamente al ritiro volontario degli atleti giovani. Pertanto, è fondamentale che i genitori e gli allenatori adottino un approccio equilibrato, che promuova la partecipazione sportiva a lungo termine e il benessere globale dell'atleta, piuttosto che concentrarsi esclusivamente sulla competizione e sulle vittorie.

In parallelo, la National Strength and Conditioning Association (2022) ha formulato linee guida che sostengono la sicurezza e l'efficacia dell'allenamento di forza per i giovani atleti, ribadendo che un programma strutturato e supervisionato correttamente può non solo migliorare le prestazioni fisiche, ma anche ridurre il rischio di infortuni e promuovere il benessere psicologico e sociale. L'allenamento con i sovraccarichi, sebbene storicamente visto con cautela per i giovani, è ora considerato un elemento essenziale per lo sviluppo delle capacità di forza, potenza e resistenza, promuovendo inoltre una sana abitudine all'esercizio fisico (Faigenbaum et al., 2009).

Il panorama attuale della ricerca scientifica e delle linee guida pratiche per l'allenamento degli atleti in età evolutiva sottolinea l'importanza di un approccio individualizzato, olistico e basato sull'evidenza. Il successo a lungo termine degli atleti giovani dipende dalla capacità di bilanciare l'allenamento, la competizione e il recupero, tenendo conto delle fasi critiche di sviluppo e delle variabili psicologiche e sociali. Il modello di sviluppo a lungo termine dell'atleta (LTAD) e le raccomandazioni del CIO e della NSCA offrono un quadro strutturato per garantire che l'allenamento promuova non solo le prestazioni atletiche, ma anche il benessere globale degli atleti, garantendo una carriera sportiva sostenibile e soddisfacente.

## 5.1 IOC Consensus Statement on training the elite child

Durante la pubertà, il tasso di crescita delle ossa e dei tessuti molli non è sincronizzato, il che espone l'atleta a un rischio maggiore di lesioni da sovraccarico, in particolare a livello delle piastre di crescita (fisi), delle apofisi e della cartilagine articolare (IOC Consensus Statement, 2008). Questo squilibrio può portare a condizioni patologiche come l'osteocondrosi e altre lesioni da stress.

Con l'avanzare del livello di maturità e competitività, è fondamentale che l'allenamento venga progressivamente adattato alle esigenze specifiche dello sport e alla fase di sviluppo puberale dell'atleta. L'approccio all'allenamento deve essere graduale e sensibile ai cicli di crescita, con un'enfasi sull'adeguata periodizzazione del carico e sulla prevenzione del sovrallenamento.

In questo contesto, la valutazione periodica e confidenziale dello stato di allenamento e nutrizionale è essenziale per monitorare la crescita e lo sviluppo degli atleti. La valutazione dovrebbe includere misure antropometriche, analisi specifiche dello sport e una valutazione clinica accurata per prevenire sovraccarichi funzionali e garantire che il giovane atleta d'élite possa raggiungere il massimo potenziale senza compromettere la salute a lungo termine.

A tal proposito, il Consensus Statement on training the elite child athlete (IOC,2008) ha pubblicato le seguenti raccomandazioni:

- si svolgano ulteriori ricerche scientifiche per identificare meglio i parametri dell'allenamento dell'atleta bambino d'élite, che devono essere comunicati efficacemente all'allenatore, all'atleta, ai genitori, agli enti sportivi e alla comunità scientifica
- le Federazioni Internazionali e gli Enti Nazionali di Governo dello Sport dovrebbero:
  - a) sviluppare programmi di sorveglianza delle malattie e delle lesioni
  - b) monitorare il volume e l'intensità degli allenamenti e dei regimi di competizione
  - c) garantire la qualità dell'allenamento e della leadership adulta
  - d) conformarsi al Codice Mondiale Antidoping
- i genitori/tutori sviluppino un forte sistema di supporto per garantire uno stile di vita equilibrato, compresa una corretta alimentazione, un sonno adeguato, lo sviluppo accademico, il benessere psicologico e opportunità di socializzazione
- gli allenatori, i genitori, gli amministratori sportivi, i media e altre parti significative dovrebbero limitare la quantità di stress da allenamento e competizione sull'atleta bambino d'élite

- l'intero processo sportivo per l'atleta bambino d'élite dovrebbe essere piacevole e appagante

La pubertà introduce variabili biologiche e psicologiche complesse che influenzano il modo in cui i giovani atleti d'élite devono essere allenati e gestiti. La sinergia tra allenamento psicologico, nutrizione e un'adeguata gestione del carico di lavoro è cruciale per promuovere uno sviluppo sano e ridurre il rischio di lesioni, burnout e problemi legati ai disturbi alimentari. In questo contesto, l'allenatore deve adattare il programma non solo all'atleta ma anche alla fase di sviluppo puberale, con l'obiettivo di ottimizzare la performance e garantire la salute a lungo termine.

Questo approccio garantisce che il giovane atleta possa allenarsi e competere in un ambiente sicuro, favorevole e privo di influenze esterne negative, proteggendo così la sua salute fisica e mentale durante la fase delicata della pubertà.

## 5.2 IOC Consensus Statement on youth athletic development

Nel novembre 2014, il Comitato Olimpico Internazionale (CIO) ha organizzato una riunione di consenso con esperti nel campo per promuovere un approccio più unificato e basato sull'evidenza nello sviluppo degli atleti giovani.

Nel testo del consenso viene sottolineato come gli allenatori di atleti giovani svolgono un ruolo cruciale nel determinare se i sistemi sportivi favoriscano il raggiungimento del picco di performance atletica, promuovendo una partecipazione duratura allo sport ed allo sviluppo personale. Per questo motivo, la formazione e il mentoring degli allenatori, finalizzati allo sviluppo delle loro competenze, dovrebbero essere una priorità per le organizzazioni sportive. L'efficacia di un allenatore si riflette non solo nella capacità di insegnare abilità tecniche, ma anche nella sua abilità di creare e mantenere relazioni positive con gli altri e di imparare costantemente dalla propria esperienza.

Un approccio efficace all'allenamento dovrebbe concentrarsi sui "quattro C" fondamentali per lo sviluppo degli atleti: Competence, Confidence, Connection and Character (Competenza, Fiducia, Connessione e Carattere). Esperienze di sviluppo ripetute e positive, attraverso attività sportive stimolanti e divertenti, che pongono l'accento su questi quattro elementi, hanno dimostrato di avere effetti a lungo termine sia sulla performance atletica sia sulla partecipazione continuativa.

La definizione di efficacia dell'allenamento, nel testo del consenso, viene definita come la capacità di applicare in modo coerente e integrato conoscenze professionali, interpersonali e intrapersonali per migliorare la competenza, la fiducia, la connessione e il carattere degli atleti, adattando tali competenze ai contesti specifici di allenamento.

Riconoscendo le sfide significative e la carenza di dati specifici per lo sport e la fase di sviluppo atletico, è fondamentale enfatizzare le migliori pratiche basate sull'evidenza. Queste dovrebbero essere adottate per ridurre al minimo il rischio di malattie e infortuni, migliorare il benessere e favorire uno sviluppo atletico sostenibile, piacevole e duraturo, contribuendo al raggiungimento di prestazioni e successi a lungo termine per tutti gli atleti giovani.

A tal fine, gli esperti del CIO raccomandano l'adozione dei seguenti principi guida:

#### Principi generali

- Lo sviluppo dell'atleta giovane deve essere considerato su base individuale, tenendo conto della crescita fisica, della maturazione biologica e dello sviluppo comportamentale, che variano per ogni persona e cambiano costantemente.
- Definire il successo sportivo in modo più ampio, includendo esperienze di vita significative, varie e salutari, centrando l'attenzione non solo sull'atleta, ma anche sullo sviluppo completo della persona.
- Adottare modelli di sviluppo dell'atleta che siano inclusivi, basati sull'evidenza e flessibili, applicando le migliori pratiche per ogni fase di sviluppo, rispettando la progressione individuale e rispondendo alle esigenze e prospettive degli atleti.
- Promuovere lo sviluppo psicologico di atleti resilienti, adattabili, dotati di robustezza mentale e autoregolazione, sostenendo i valori dell'olimpismo e l'eccellenza personale a lungo termine.
- Incoraggiare la partecipazione dei bambini a una varietà di attività sportive strutturate e non strutturate, adatte all'età, per sviluppare abilità atletiche e sociali diverse, favorendo una partecipazione continua e piacevole allo sport.
- Impegnarsi a garantire sicurezza, salute e rispetto delle regole e degli altri atleti, adottando politiche e procedure contro molestie e abusi.
- Supportare gli atleti lungo il loro percorso sportivo, aiutandoli a bilanciare efficacemente sport e vita personale, preparandoli anche per la vita dopo lo sport.

## Allenamento

- Creare un ambiente sportivo stimolante e piacevole, incentrato sugli asset personali degli atleti e orientato alla padronanza delle abilità.
- Le pratiche di allenamento devono essere basate su linee guida di sviluppo basate sulla ricerca, che promuovano flessibilità e innovazione, adattando le abilità alle traiettorie individuali di sviluppo.
- L'allenamento deve essere specifico per il contesto (ad esempio, orientato alla partecipazione o alla performance) e allineato con la prontezza atletica individuale.
- I programmi di formazione per allenatori devono facilitare la creazione di relazioni significative tra allenatori e atleti, arricchendo le capacità personali e interpersonali degli atleti, come la riflessione e le abilità comunicative.
- Promuovere la partecipazione regolare a programmi di forza e condizionamento adeguati all'età, sicuri, piacevoli e basati su tecniche di qualità.
- I programmi di sviluppo per giovani atleti devono includere una varietà di esperienze sportive per ridurre il rischio di infortuni da sovraccarico, prevenire problemi di salute legati a carichi eccessivi e fornire riposo sufficiente per garantire adattamenti positivi e uno sviluppo progressivo.
- Mantenere un approccio etico nella traduzione delle conoscenze da test di laboratorio e sul campo, ottimizzando la partecipazione e la performance nello sport giovanile.
- Sviluppare e implementare strategie per la prevenzione degli infortuni e la promozione della salute negli atleti giovani, come l'app Get Set—Train Smarter creata dal CIO per i Giochi Olimpici Giovanili del 2014.
- Promuovere programmi di prevenzione degli infortuni basati sull'evidenza, regolamentazioni sull'uso dell'equipaggiamento protettivo e cambiamenti delle regole, garantendo al contempo l'integrità dello sport e la partecipazione sicura.
- Adottare il principio secondo cui nessun atleta giovane dovrebbe allenarsi o competere mentre prova dolore o non è completamente riabilitato da un infortunio o malattia.

## Nutrizione, idratazione e malattia da calore da sforzo

- L'educazione alimentare per i giovani atleti dovrebbe promuovere abitudini alimentari ottimali, supportando la salute, la crescita e le richieste sportive, con un apporto equilibrato di carboidrati nutrienti, proteine di qualità, calcio, vitamina D e ferro.

- Educare gli atleti e il loro staff sui rischi legati agli integratori alimentari e alle bevande energetiche.
- Mitigare i rischi di disturbi alimentari come DE e RED-S attraverso educazione, screening, trattamento e modifiche delle regole dove applicabile.
- Formare gli atleti, gli allenatori e il personale sui rischi della malattia da calore da sforzo e su strategie preventive, includendo misure di compensazione, protocolli di gestione e politiche efficaci.
- Predisporre piani d'azione di emergenza per gestire le malattie da calore e altre emergenze mediche, con personale addestrato e strutture adeguate facilmente disponibili per tutte le attività sportive giovanili, specialmente nei climi caldi.

### 5.3 Long-term athlete development di Istvan Balyi

Il modello di Long-Term Athlete Development (LTAD), sviluppato da Istvan Balyi, rappresenta un framework fondamentale per lo sviluppo ottimale degli atleti, fornendo una guida dettagliata su come strutturare l'allenamento in base alle diverse fasi di crescita e maturazione. Questo modello sottolinea l'importanza di riconoscere le cosiddette "finestre di opportunità" durante l'infanzia e l'adolescenza, momenti chiave in cui i giovani atleti mostrano una maggiore predisposizione all'adattamento in specifiche capacità fisiche, come resistenza, forza, velocità, abilità motorie e flessibilità.

Il concetto di "trainability", o allenabilità ottimale, proposto da Balyi, si basa su un'approfondita comprensione del PHV e delle variazioni individuali nella maturazione biologica. Attraverso l'uso del PHV come riferimento, il modello LTAD mira a personalizzare i programmi di allenamento in modo da sfruttare al massimo i periodi "critici" di sviluppo, garantendo un percorso di crescita atletica sostenibile e a lungo termine.

Secondo il modello di Balyi et al. (2004), gli sport possono generalmente essere classificati in due categorie: sport di specializzazione precoce e sport di specializzazione tardiva. La specializzazione precoce riguarda sport come tuffi, pattinaggio artistico, ginnastica, ginnastica ritmica e tennis da tavolo, che richiedono un'attenzione specifica e specializzata già nelle prime fasi di allenamento. Al contrario, gli sport di specializzazione tardiva, come l'atletica leggera, gli sport da combattimento, il ciclismo, gli sport con racchetta, il canottaggio e tutti gli sport di squadra, richiedono un approccio inizialmente più generalizzato all'allenamento. In questi sport,

nelle prime due fasi di sviluppo, l'attenzione deve essere posta sullo sviluppo delle abilità motorie generali e delle competenze tecnico-tattiche.

Gli sport di specializzazione precoce seguono generalmente un modello a quattro fasi, mentre quelli di specializzazione tardiva richiedono un modello a sei fasi (Figura 29):

<b>Early Specialization Model</b>	<b>Late Specialization Model</b>
1. Training to Train stage	1. FUNdamental stage
2. Training to Compete	2. Learning to Train
3. Training to Win	3. Training to Train
4. Retirement / retainment	4. Training to Compete
	5. Training to Win
	6. Retirement / retainment

Figura 29– Fasi del modello per la specializzazione precoce (sinistra), per la specializzazione tardiva (destra)- Balyi et al. (2004)

Essendo il calcio uno sport caratterizzato da una specializzazione tardiva, saranno illustrate le fasi specifiche descritte dall'autore per questa categoria.

#### Fase 1 - La Fase FUNdamentale™

ETÀ: Maschi 6 - 9 / Femmine 6 - 8 anni

Obiettivo: Imparare tutte le abilità motorie fondamentali (sviluppare abilità motorie complessive)

Le abilità motorie fondamentali dovrebbero essere praticate e padroneggiate prima che vengano introdotte le abilità specifiche per lo sport. Lo sviluppo di queste abilità, utilizzando un approccio positivo e divertente, contribuirà significativamente ai futuri successi atletici. È anche incoraggiata la partecipazione a un'ampia gamma di sport. Questo accento sullo sviluppo motorio produrrà giocatori/atleti che hanno una migliore capacità di allenamento per lo sviluppo sportivo specifico a lungo termine. Le abilità motorie fondamentali sono osservabili come abilità locomotorie, manipolative e di stabilità.

Ci sono tre fasi di sviluppo delle abilità motorie fondamentali: iniziale (2-3 anni), elementare (4-5 anni) e matura (6-7 anni).

La fase "FUNdamentale" dovrebbe essere ben strutturata e divertente! L'accento è sullo sviluppo complessivo delle capacità fisiche del giocatore/atleta e delle abilità motorie fondamentali, e sugli ABC dell'atletismo - Agilità, Equilibrio, Coordinazione e Velocità. È incoraggiata la partecipazione a quanti più sport possibile. Velocità, potenza e resistenza sono

sviluppate utilizzando giochi DIVERTENTI. Le tecniche appropriate e corrette di corsa, salto e lancio sono insegnate utilizzando gli ABC dell'atletica. La prima "finestra di adattamento accelerato alla velocità" o "periodo critico di sviluppo della velocità" si verificherà durante questa fase, tra i 6-8 anni per le ragazze e i 7-9 anni per i ragazzi rispettivamente. La velocità lineare, laterale e multidirezionale dovrebbe essere sviluppata e la durata delle ripetizioni dovrebbe essere inferiore a 5 secondi. Questo è spesso chiamato la finestra di "agilità, rapidità, cambio di direzione". Anche qui, il divertimento e i giochi dovrebbero essere utilizzati per l'allenamento della velocità e il volume dell'allenamento dovrebbe essere inferiore. L'allenamento della forza durante questa fase dovrebbe includere esercizi che utilizzano il peso corporeo del bambino; esercizi con la palla medica e con la Swiss ball. Ai bambini dovrebbero essere introdotte le semplici regole ed etiche dello sport. Non si verifica periodizzazione, ma tutti i programmi sono strutturati e monitorati. Le attività ruotano attorno all'anno scolastico e durante le vacanze estive e invernali, si raccomandano campi multisport. Se i bambini e i genitori hanno uno sport preferito, si raccomanda la partecipazione una o due volte a settimana, ma la partecipazione ad altri sport tre o quattro volte a settimana è essenziale per l'eccellenza futura. Se i bambini decidono in seguito di lasciare il flusso competitivo, le competenze acquisite durante la fase Fondamentale saranno comunque vantaggiose quando si impegnano in attività ricreative, che miglioreranno la loro qualità di vita e salute.

## Fase 2 - La fase di Imparare ad Allenarsi

ETÀ: Maschi 9 – 12 / Femmine 8 – 11 anni

Obiettivo: Imparare tutte le abilità sportive fondamentali (sviluppare abilità sportive complessive)

Le abilità di movimento specializzate si sviluppano dai sette agli undici anni e sono abilità sportive specializzate. Non superare la fase di sviluppo delle abilità fondamentali e specializzate può essere dannoso per il futuro coinvolgimento del bambino nell'attività fisica e nello sport. La specializzazione precoce negli sport di specializzazione tardiva può essere anche dannosa per le fasi successive dello sviluppo delle abilità. Uno dei periodi più importanti dello sviluppo motorio per i bambini è tra i 9 e i 12 anni. Durante questo tempo i bambini sono pronti a livello di sviluppo per acquisire abilità sportive generali complessive che sono la base di tutto lo sviluppo atletico. Questa è la "finestra di adattamento accelerato alla coordinazione motoria". Tutte le abilità motorie fondamentali dovrebbero essere ulteriormente sviluppate e generali abilità sportive complessive dovrebbero essere apprese durante questa fase. Se l'allenamento

delle abilità motorie fondamentali non viene sviluppato tra gli otto ai 11 e nove ai 12 anni rispettivamente per femmine e maschi, una significativa finestra di opportunità è stata persa, compromettendo la capacità del giovane giocatore/atleta di raggiungere il suo pieno potenziale. La forza dovrebbe essere sviluppata tramite esercizi con palla medica, Swiss ball e il peso del corpo così come esercizi di saltellamento (o routine). La resistenza dovrebbe essere ulteriormente sviluppata tramite giochi e staffette. Esercizi di flessibilità di base dovrebbero essere introdotto durante questa fase, mentre la velocità può essere ulteriormente sviluppata con attività specifiche durante il riscaldamento, come agilità, rapidità e cambio di direzione. La competizione dovrebbe essere ben strutturata. Il framework più adatto è la periodizzazione singola per questa fase, tuttavia per alcuni sport, le esigenze specifiche dello sport giustificherebbero una doppia periodizzazione (ad es. nuoto, tennis). Si raccomanda un rapporto di allenamento/pratica alla competizione del 70:30.

### Fase 3 - La Fase di Allenamento per Allenarsi <sup>TM</sup>

ETÀ: Maschi 12 - 16 / Femmine 11 - 15 anni

**Obiettivi:** Costruire la base aerobica, sviluppare la forza verso la fine della fase e ulteriore sviluppo delle abilità specifiche per lo sport (costruire il "motore" e consolidare le abilità specifiche per lo sport).

Durante la fase di "Allenamento per Allenarsi", i giovani atleti consolidano le abilità specifiche di base per lo sport e le tattiche. Questa fase è una "finestra di adattamento accelerato all'allenamento aerobico e di forza".

L'allenabilità aerobica ottimale inizia con l'inizio del PHV o il maggiore scatto di crescita durante la maturazione. L'allenamento aerobico dovrebbe essere prioritario dopo l'inizio del PHV, mentre abilità, velocità e forza dovrebbero essere mantenute o sviluppate ulteriormente. È richiesto anche un'enfasi speciale sull'allenamento della flessibilità a causa della crescita improvvisa di ossa, tendini, legamenti e muscoli. Ci sono due finestre di adattamento accelerato all'allenamento di forza per le femmine.

La prima finestra inizia immediatamente dopo il PHV e la seconda finestra inizia con l'insorgenza del menarca (il primo ciclo mestruale). Questa finestra per i maschi inizia 12 - 18 mesi dopo il PHV. È importante notare che sia la capacità di allenamento aerobico che quella di forza dipendono dai livelli di maturazione, quindi i maturatori precoci, medi o tardivi necessitano di diversi tempi per l'enfasi dell'allenamento. Attualmente, la maggior parte di

queste decisioni sono prese in base all'età cronologica (gruppi di età) e non in base alle esigenze individuali di livello di maturazione.

La periodizzazione singola, doppia e occasionalmente (a seconda delle esigenze specifiche dello sport) tripla è il quadro ottimale di preparazione durante questa fase. Durante le competizioni, gli atleti giocano per vincere e fare del loro meglio, ma il focus principale dell'allenamento è sull'apprendimento delle basi piuttosto che sulla competizione. I rapporti tra allenamento e competizione sono ottimizzati perché troppe competizioni sprecano prezioso tempo di allenamento e viceversa, non abbastanza competizione inibisce la pratica delle abilità tecniche/tattiche e l'apprendimento di come affrontare le sfide fisiche e mentali presentate durante la competizione.

Un rapporto di allenamento del 60 per cento e competizione del 40 per cento è raccomandato dagli esperti durante la fase di "Allenamento per Allenarsi" e il 40 per cento di competizione include la competizione e l'allenamento specifico per la competizione. Tuttavia, queste percentuali variano in base allo sport e alle esigenze specifiche individuali. Gli atleti che intraprendono questo tipo di preparazione saranno meglio preparati per la competizione sia nel breve che nel lungo termine, rispetto a coloro che si concentrano esclusivamente sulla vittoria. Durante questa fase, gli atleti si allenano in situazioni competitive quotidianamente, sotto forma di partite di allenamento o giochi competitivi.

La fase di "Allenamento per Allenarsi" affronta due dei periodi critici o sensibili dello sviluppo fisico. Gli atleti che perdono questa fase di allenamento non raggiungeranno il loro pieno potenziale, poiché questi periodi critici sono stati persi. Il motivo per cui molti atleti si fermano durante la fase successiva della loro carriera è principalmente a causa di un'eccessiva enfasi sulla competizione invece che sull'allenamento durante questo importante periodo del loro sviluppo atletico.

Le fasi di "Imparare ad Allenarsi" e "Allenamento per Allenarsi" sono le fasi più importanti della preparazione atletica. Durante queste fasi "facciamo o roviniamo un atleta!"

#### Fase 4 - La Fase di Allenamento per Competere <sup>TM</sup>

ETÀ: Maschi 16 - 18 / Femmine 15 - 17 anni

Obiettivi: Ottimizzare la preparazione fisica e le abilità sportive, individuali e specifiche per posizione così come la performance (ottimizzare "motore", abilità e performance).

Questa fase di sviluppo viene introdotta dopo che gli obiettivi della fase di "Allenamento per Allenarsi" sono stati raggiunti. Il rapporto tra allenamento e competizione e l'allenamento

specifico per la competizione cambia ora in 50:50. Cinquanta per cento del tempo disponibile è dedicato allo sviluppo delle abilità tecniche e tattiche e al miglioramento della forma fisica, e il cinquanta per cento è dedicato alla competizione e all'allenamento specifico per la competizione.

Durante la fase di "Allenamento per Competere", viene fornito agli atleti un allenamento ad alta intensità specifico per evento e posizione tutto l'anno. Gli atleti, che ora sono proficienti nell'esecuzione sia delle abilità di base che di quelle specifiche per lo sport, imparano a eseguire queste abilità sotto una varietà di condizioni competitive durante l'allenamento. Viene posta un'enfasi speciale sulla preparazione ottimale modellando l'allenamento e la competizione. Programmi di fitness, programmi di recupero, preparazione psicologica e sviluppo tecnico sono ora personalizzati in misura maggiore. Questa enfasi sulla preparazione individuale affronta i punti di forza e di debolezza individuali di ciascun atleta. La periodizzazione doppia e multipla è il quadro ottimale di preparazione.

#### Fase 5 - La Fase di Allenamento per Vincere™

ETÀ: Maschi 18 anni e più / Femmine 17 anni e più

Obiettivi: Massimizzare la preparazione fisica e le abilità sportive, individuali e specifiche per posizione così come la performance (massimizzare "motore", abilità e performance) Questa è la fase finale della preparazione atletica. Tutte le capacità fisiche, tecniche, tattiche, mentali, personali e di stile di vita dell'atleta sono ora pienamente stabilite e il focus dell'allenamento si è spostato sulla massimizzazione della performance. Gli atleti sono allenati per raggiungere il picco nelle competizioni principali. L'allenamento è caratterizzato da alta intensità e volume relativamente alto. Frequenti pause "profilattiche" (preventive) aiutano a prevenire esaurimenti fisici e mentali. Il rapporto allenamento-competizione in questa fase è 25:75, con la percentuale di competizione che include attività di allenamento specifiche per la competizione.

#### Fase 6 - La Fase di Ritiro / Mantenimento

Obiettivi: Mantenere gli atleti per coaching, amministrazione, ufficiali, ecc.

Questa fase si riferisce alle attività svolte dopo che un atleta si è ritirato permanentemente dalla competizione. Durante questa fase finale, alcuni ex atleti si trasferiscono in carriere legate allo sport che possono includere allenamento, arbitraggio, amministrazione sportiva, piccole imprese, competizioni master, media, ecc.

Il modello di Balyi, nel suo insieme, è osservabile nella figura 30.

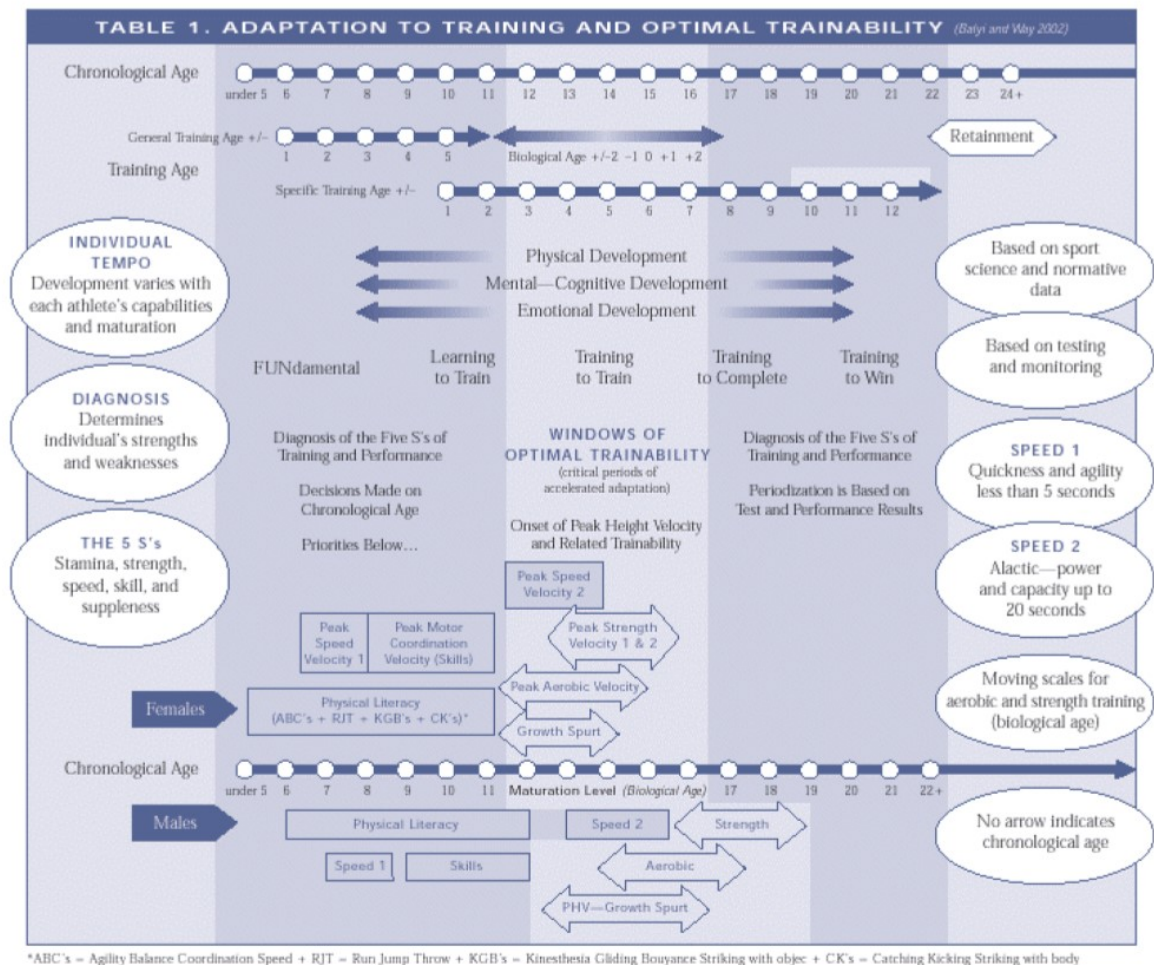


Figura 30– Modello di Balyi et al. (2004)

#### 5.4 The Youth Physical Development Model di Lloyd e Oliver

Il seguente modello introduce un nuovo approccio alternativo che copre lo sviluppo fisico dall'infanzia (a partire dai 2 anni) fino all'età adulta (oltre i 21 anni). Il modello, denominato the youth physical development model (YPD) (Figura 31), offre una visione completa dello sviluppo fisico sia per i ragazzi e sia per le ragazze. Questo modello ha l'obiettivo di fornire a preparatori fisici, allenatori sportivi, educatori e genitori una panoramica dettagliata dello sviluppo fisico globale, identificando in modo chiaro quando e perché enfatizzare l'allenamento delle varie componenti della condizione fisica.

YOUTH PHYSICAL DEVELOPMENT (YPD) MODEL FOR MALES																										
CHRONOLOGICAL AGE (YEARS)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21+						
AGE PERIODS	EARLY CHILDHOOD			MIDDLE CHILDHOOD						ADOLESCENCE						ADULTHOOD										
GROWTH RATE	RAPID GROWTH			↔			STEADY GROWTH			↔			ADOLESCENT SPURT			↔			DECLINE IN GROWTH RATE							
MATURATIONAL STATUS	YEARS PRE-PHV										←		PHV		→				YEARS POST-PHV							
TRAINING ADAPTATION	PREDOMINANTLY NEURAL (AGE-RELATED)										↔								COMBINATION OF NEURAL AND HORMONAL (MATURITY-RELATED)							
PHYSICAL QUALITIES	FMS	FMS			FMS			FMS																		
	SSS	SSS			SSS			SSS																		
	Mobility	Mobility						Mobility																		
	Agility	Agility						Agility			Agility															
	Speed	Speed						Speed			Speed															
	Power	Power						Power			Power															
	Strength	Strength						Strength			Strength															
	Hypertrophy											Hypertrophy		Hypertrophy				Hypertrophy								
	Endurance & MC	Endurance & MC						Endurance & MC			Endurance & MC															
	TRAINING STRUCTURE	UNSTRUCTURED			LOW STRUCTURE			MODERATE STRUCTURE			HIGH STRUCTURE			VERY HIGH STRUCTURE												

Figure 1. The YPD model for males. Font size refers to importance; light blue boxes refer to preadolescent periods of adaptation, dark blue boxes refer to adolescent periods of adaptation. FMS = fundamental movement skills; MC = metabolic conditioning; PHV = peak height velocity; SSS = sport-specific skills; YPD = youth physical development.

Figura 31 - The Youth Physical Development Model di Lloyd e Oliver (2012)

Nel modello YPD, l'importanza di ciascuna qualità fisica è rappresentata dalla grandezza del carattere (font size): più grande è il carattere, maggiore è l'importanza di allenare quella qualità in una determinata fase dello sviluppo. Ad esempio, per un ragazzo di 12-13 anni, il focus dell'allenamento dovrebbe essere orientato principalmente su forza, potenza, velocità, agilità e abilità sportive specifiche (SSS), con un'enfasi minore su ipertrofia, mobilità, abilità motorie fondamentali (FMS), resistenza e condizionamento metabolico. Le caselle azzurre si riferiscono ai periodi di adattamento preadolescenziali, mentre le caselle blu scuro si riferiscono ai periodi di adattamento adolescenziali. FMS = abilità motorie fondamentali; MC = condizionamento metabolico; PHV = picco di velocità di crescita; SSS = abilità specifiche per lo sport; YPD = sviluppo fisico giovanile.

Il modello YPD riflette questa logica: lo sviluppo delle abilità motorie fondamentali (FMS) è prioritario fino all'inizio della pubertà, mentre l'attenzione si sposta sulle SSS durante

l'adolescenza. Tuttavia, il modello mostra chiaramente che sia le FMS che le SSS sono presenti in ogni fase dello sviluppo, con un'enfasi che varia in base al periodo di crescita.

Il modello esamina in dettaglio le raccomandazioni principali associate a ciascun elemento che lo compone. In sintesi, verranno presentate le raccomandazioni chiave, mentre per un'analisi più approfondita si rimanda al documento originale.

#### Forza – STRENGTH, HYPERTROPHY, POWER

Lo sviluppo della forza muscolare dovrebbe essere una priorità in tutte le fasi dello sviluppo giovanile. Si raccomanda di includere l'allenamento della forza già dall'infanzia, sfruttando la plasticità neurale prepuberale, per massimizzare lo sviluppo neuromuscolare e ottenere miglioramenti significativi nella forza. Per la mancanza di androgeni circolanti nei bambini prepuberi, significativi aumenti nella dimensione muscolare sono limitati prima dell'adolescenza, viene suggerito di perseguire obiettivo dell'ipertrofia muscolare principalmente dopo il picco di crescita.

Le sessioni di sviluppo della forza non dovrebbero essere semplicemente aggiunte ai programmi di allenamento, ma piuttosto sostituire altre forme di allenamento, come le sessioni di endurance o gli allenamenti tecnici, per evitare sovraccarico e ottimizzare i benefici. La forza muscolare è strettamente associata a molte abilità fisiche, tra cui velocità di corsa, potenza muscolare, velocità di cambiamento di direzione, abilità pliometriche e resistenza. È inoltre fondamentale per lo sviluppo delle abilità motorie fondamentali (FMS).

Per quanto riguarda lo sviluppo della potenza, sebbene venga maggiormente enfatizzato dopo la pubertà, anche i bambini prepuberi possono ottenere miglioramenti significativi, sebbene il loro tasso di sviluppo possa differire da quello degli adolescenti. Poiché la potenza è essenziale per il successo sportivo, dovrebbe essere integrata sistematicamente nei programmi di sviluppo atletico giovanile, tenendo conto che sia i bambini che gli adolescenti possono trarre benefici dall'allenamento della potenza.

#### Velocità ed agilità – SPEED, AGILITY

La velocità è allenabile in tutte le fasi dello sviluppo, dall'infanzia all'adolescenza. I bambini prepuberi beneficiano maggiormente dall'allenamento che richiede elevati livelli di attivazione neurale, come la pliometria e l'allenamento allo sprint, mentre gli adolescenti rispondono meglio ad un metodo misto di attivazioni neurali e stimoli strutturali (forza e pliometria).

L'allenamento dell'agilità dovrebbe iniziare durante l'infanzia con lo sviluppo delle capacità motorie di base e progressivamente includere movimenti più complessi e specifici per lo sport durante l'adolescenza. L'attenzione dovrebbe essere posta sia sulla velocità di cambiamento di direzione sia sulla funzione cognitiva, considerando che l'esposizione ripetuta a stimoli specifici potrebbe migliorare i tempi di risposta e, di conseguenza, la performance di agilità. La funzione cognitiva dovrebbe essere allenata attraverso esercizi che replicano le situazioni sportive reali per migliorare la reattività e la capacità di prendere decisioni rapide in contesti dinamici. Sempre tenendo a mente che il picco di crescita adolescenziale e l'aumento della lunghezza degli arti può influire negativamente sul controllo motorio, portando a una fase di "goffaggine adolescenziale", che può richiedere una rielaborazione degli schemi motori. Lo sviluppo dell'agilità dovrebbe iniziare durante l'infanzia, con un'enfasi sulla coordinazione e la precisione dei movimenti, e proseguire durante l'adolescenza con un focus sulla forza e la velocità.

#### Mobilità e condizionamento metabolico – MOBILITY, ENDURANCE AND METABOLIC CONDITIONING

Il modello YPD non considera la mobilità come l'elemento principale in nessuna fase dello sviluppo, ma la riconosce come parte essenziale di qualsiasi programma di allenamento, necessaria per garantire che gli atleti possano raggiungere i range di movimento richiesti per il loro sport.

Per quanto riguarda il condizionamento metabolico, indipendentemente dalla fase di maturazione, i bambini prepuberi, mid puberi e postpuberi possono ottenere miglioramenti significativi nelle prestazioni di resistenza, come evidenziato dalle risposte di VO<sub>2</sub>max. Il modello YPD propone di dare maggiore attenzione alla resistenza man mano che l'atleta si avvicina all'età adulta, evitando di considerarla come il focus principale nelle fasi precedenti dello sviluppo. Viene sottolineato che lo sviluppo della resistenza specifica per lo sport può avvenire naturalmente durante la partecipazione a partite, competizioni e sessioni tecniche, riducendo la necessità di allenamenti analitici durante l'infanzia.

Il modello YPD pone l'atleta al centro del processo di sviluppo, promuovendo una crescita fisica, mentale e sociale a lungo termine, piuttosto che risultati immediati. Questo approccio mira a creare un ambiente che favorisca il benessere complessivo dell'atleta, incoraggiando la motivazione intrinseca e una percezione positiva delle proprie capacità. Attraverso il progresso continuo e l'acquisizione di nuove abilità, il modello contribuisce a sviluppare un forte senso di competenza, un elemento cruciale per il benessere. Le esperienze positive legate al superamento

di sfide e alla varietà nell'allenamento non solo aumentano la motivazione a lungo termine, ma migliorano anche la resilienza degli atleti, favorendo la loro competenza e motivazione a lungo termine.

## 6. Protocolli ed indicazioni per l'allenamento della forza in età giovanile

Come espresso da Lloyd et al. (2012), il successo di un programma di sviluppo a lungo termine dipende in gran parte dalla qualità della formazione e dall'educazione che l'atleta riceve dall'allenatore. Gli infortuni legati all'allenamento nei bambini e adolescenti si verificano solo in casi in cui un giovane atleta è stato sottoposto a un allenamento eccessivo, mal prescritto o poco compreso, che ha causato condizioni gravi come la rhabdomiolisi da sforzo e il ricovero ospedaliero. Tuttavia, al di fuori di questi rari casi, la maggior parte degli infortuni legati all'allenamento con i sovraccarichi tende a essere accidentale, e la frequenza di tali incidenti diminuisce con l'età (Lloyd et al. 2012).

Per prevenire tali rischi, è essenziale che gli allenatori che lavorano con giovani atleti abbiano le giuste competenze. In primo luogo, devono possedere una qualifica riconosciuta nel campo della forza e del condizionamento. In secondo luogo, devono avere una solida base di conoscenze sulla scienza dell'allenamento, preferibilmente acquisita tramite studi universitari o post-laurea. Infine, è importante che abbiano una buona formazione pedagogica per poter adattare i propri stili di comunicazione e interazione in base all'età degli atleti, che può variare dalla fase prepuberale fino all'adolescenza avanzata. Questi requisiti aiutano a garantire che i programmi di sviluppo degli atleti giovani siano strutturati in modo sicuro ed efficace, con una corretta selezione degli esercizi, progressioni adeguate, carichi di lavoro appropriati e tempi di recupero sufficienti. Inoltre, una chiara definizione degli obiettivi e una filosofia di allenamento orientata allo sviluppo olistico dell'atleta contribuiscono a una crescita equilibrata e sana.

Faigenbaum et al. (2009) hanno pubblicato un documento aggiornato della National Strength and Conditioning Association con le raccomandazioni della NSCA sull'allenamento della forza per i giovani.

La posizione attuale della NSCA è la seguente:

1. Un programma di allenamento per la forza ben progettato e supervisionato è generalmente sicuro per i giovani.
2. Un programma di allenamento per la forza ben strutturato e supervisionato può migliorare la forza e la potenza muscolare nei giovani.

3. Un programma di allenamento per la forza correttamente organizzato e monitorato può migliorare i fattori di rischio cardiovascolare nei giovani.
4. Un programma di allenamento per la forza adeguatamente progettato e supervisionato può potenziare le abilità motorie e contribuire a migliorare le prestazioni sportive dei giovani.
5. Un programma di allenamento per la forza ben supervisionato può aumentare la capacità dei giovani atleti di resistere agli infortuni sportivi.
6. Un programma di allenamento per la forza ben gestito può favorire il benessere psicosociale nei giovani.
7. Un programma di allenamento per la forza ben strutturato può promuovere e sviluppare abitudini di esercizio sane durante l'infanzia e l'adolescenza.

Contrariamente a quanto si potrebbe pensare, non esiste un'età minima definita per iniziare l'allenamento con i sovraccarichi. I bambini possono partecipare a programmi di allenamento della forza fin da quando sono mentalmente e fisicamente in grado di seguire le istruzioni degli allenatori e di affrontare in modo sicuro lo stress dell'allenamento. In genere, se un bambino è pronto per partecipare a sport, di solito intorno ai 7-8 anni, è anche pronto per iniziare un programma di allenamento contro resistenze (Faigenbaum et al., 2009).

Una delle componenti più importanti dell'allenamento per la forza giovanile è la corretta pianificazione e progressione delle variabili del programma. È fondamentale fornire istruzioni dettagliate sulla tecnica corretta di sollevamento, sui principi di sicurezza e sui metodi di progressione degli esercizi. Gli allenatori devono quindi adottare un approccio sistematico nella gestione delle variabili dell'allenamento, tra cui la scelta degli esercizi, l'intensità e il volume, i tempi di riposo e la frequenza delle sessioni. La strutturazione progressiva di queste variabili, unita a una supervisione qualificata e all'impegno individuale dell'atleta, determina i risultati associati all'allenamento.

Faigenbaum et al. (2009), per garantire la sicurezza e l'efficacia del programma di allenamento per la forza in età giovanile, considerano diverse variabili che devono essere rispettate nella fase di progettazione. Queste includono:

- Warm-up and Cool-down: Fasi obbligatorie per preparare il corpo all'allenamento e favorire il recupero.
- Scelta e ordine degli esercizi: Gli esercizi dovrebbero essere scelti in base alle esigenze dell'atleta e alla fase di sviluppo, con una progressione logica.

- Intensità e volume dell'allenamento: Parametri fondamentali da modulare in base all'età e alle capacità dell'atleta, garantendo un progresso graduale e sicuro.
- Intervalli di riposo tra serie ed esercizi: Importanti per il recupero e la prevenzione dell'affaticamento eccessivo.
- Frequenza e velocità delle ripetizioni: Da adattare alla fase di sviluppo del giovane atleta, garantendo sempre la corretta esecuzione tecnica.

Gli stessi (Faigenbaum et al., 2009) entrano poi nello specifico per ogni sezione:

Riscaldamento e defaticamento:

- Un riscaldamento dinamico di 5-10 minuti dovrebbe precedere le sessioni di allenamento per ottimizzare la funzione neuromuscolare.
- Lo stretching statico dovrebbe essere evitato nel riscaldamento pre-allenamento, ma può essere utile nel defaticamento post-allenamento per rilassare il corpo e migliorare la flessibilità.
- Il defaticamento dovrebbe includere esercizi leggeri a corpo libero e stretching statico, con riflessioni sugli obiettivi raggiunti e su quelli futuri.

Scelta ed ordine degli esercizi:

- Scegliere esercizi che promuovano l'equilibrio muscolare e siano adeguati al livello di esperienza e capacità del giovane atleta.
- Si consiglia di eseguire allenamenti per tutto il corpo più volte alla settimana, includendo esercizi che coinvolgono tutti i principali gruppi muscolari in ogni sessione. In questo tipo di approccio, è importante eseguire prima gli esercizi che coinvolgono i grandi gruppi muscolari, seguiti da quelli per i gruppi muscolari più piccoli. Allo stesso modo, gli esercizi multi-articolari dovrebbero precedere quelli mono-articolari. È inoltre vantaggioso iniziare la sessione con gli esercizi più impegnativi, quando il sistema neuromuscolare è fresco e meno affaticato, per garantire una tecnica corretta e massimizzare l'efficacia dell'allenamento
- Assicurarsi che ogni esercizio venga eseguito in modo controllato, enfatizzando la tecnica corretta sia nelle fasi concentriche che eccentriche.

Intensità e volume dell'allenamento

- Iniziare con 1-2 serie di 10-15 ripetizioni con carichi leggeri o moderati per sviluppare la tecnica corretta.

- Progredire gradualmente verso serie aggiuntive e carichi più pesanti (6-10RM) per massimizzare i guadagni di forza e potenza muscolare.
- Eseguire esercizi di potenza, come movimenti pliometrici, con un numero inferiore di ripetizioni (3-6 per serie) per mantenere l'efficacia del movimento e prevenire la fatica.
- Adattare il numero di serie e ripetizioni in base agli esercizi, privilegiando carichi maggiori per movimenti multi-articolari e carichi moderati per esercizi mono-articolari.
- Utilizzare scale di percezione dello sforzo per valutare l'intensità percepita dai giovani atleti e adattare di conseguenza la prescrizione dell'allenamento.
- Se i test di 1RM non vengono eseguiti, un approccio semplice può essere prima stabilire l'intervallo di ripetizioni e poi, mediante tentativi ed errori, determinare il carico massimo che può essere gestito per il range di ripetizioni prescritto

#### Intervalli di riposo tra serie ed esercizi

- Nei giovani, intervalli di riposo di circa 1 minuto sono generalmente sufficienti per esercizi a intensità moderata.
- Adolescenti che eseguono esercizi di potenza o abilità elevata possono richiedere intervalli di riposo più lunghi (2-3 minuti) per mantenere la qualità della prestazione.
- L'intensità, il volume dell'allenamento e il livello di fitness devono essere presi in considerazione per determinare la durata ottimale degli intervalli di riposo.

#### Velocità della ripetizione

La velocità con cui vengono eseguiti gli esercizi può influenzare gli adattamenti fisiologici e la tecnica dell'allenamento. Nei giovani, si consiglia di eseguire gli esercizi di resistenza a una velocità moderata e controllata per garantire una corretta esecuzione tecnica, soprattutto quando si utilizzano carichi leggeri. Tuttavia, per esercizi che richiedono movimenti esplosivi, come i pliometrici o i sollevamenti pesi, si dovrebbe mantenere una velocità elevata ma sotto controllo da un punto di vista tecnico. Utilizzare una varietà di velocità di esecuzione all'interno del programma di allenamento può fornire uno stimolo efficace per diversi adattamenti muscolari.

#### Frequenza di allenamento

- Una frequenza di 2-3 sessioni a settimana su giorni non consecutivi è ideale per migliorare la forza nei giovani.

- L'allenamento una volta a settimana può essere utile per mantenere i guadagni di forza, ma non per progredire.
- Nei giovani che si allenano più di 3 volte a settimana, è fondamentale monitorare il volume e l'intensità dell'allenamento, le abitudini alimentari e il sonno per garantire un adeguato recupero e adattamento.

#### Programma variabile e periodizzazione

La periodizzazione, ossia la variazione sistematica delle variabili di allenamento nel tempo, è un approccio chiave per ottimizzare i guadagni a lungo termine, prevenire la noia e ridurre il rischio di infortuni da sovraccarico. Nei giovani atleti, la periodizzazione permette al corpo di adattarsi gradualmente a carichi crescenti, favorendo miglioramenti costanti e limitando i plateau di prestazione che tendono a manifestarsi dopo 8-12 settimane di allenamento.

- Iniziare sempre con carichi leggeri e progredire gradualmente, insegnando prima la corretta tecnica di esecuzione degli esercizi.
- La periodizzazione dovrebbe includere carichi moderati-pesanti per lo sviluppo della forza e carichi leggeri-moderati per l'allenamento di potenza, eseguiti a velocità esplosive.
- Per gli esercizi di potenza, come il power clean e il push press, è fondamentale mantenere una corretta tecnica e una velocità massima per ogni ripetizione, anche attraverso brevi pause tra le ripetizioni per garantire una posizione di partenza corretta.
- La periodizzazione con recuperi adeguati tra le sessioni aumenta i guadagni di forza e potenza nei giovani, migliorando le possibilità di adesione ai programmi di allenamento nel lungo termine.
- Implementare periodi di riposo attivo nel programma annuale, soprattutto per gli atleti che partecipano a più sport.
- Durante i periodi di allenamento più intensi, includere sessioni educative su fattori dello stile di vita, come l'alimentazione, il sonno e la gestione dello stress, per promuovere il rendimento a lungo termine.

Per adattare i programmi di allenamento alla progressiva evoluzione delle capacità dei giovani atleti, è fondamentale classificare l'esperienza di allenamento in tre livelli principali: principiante, intermedio e avanzato. Questa differenziazione consente di calibrare il carico, il volume e l'intensità degli esercizi per ciascun atleta in base al loro livello di esperienza.

- Principianti: Individui con 2-3 mesi di esperienza o inattivi da diversi mesi, per i quali è necessario un carico leggero e una particolare attenzione alla tecnica.
- Intermedi: Atleti con 3-12 mesi di esperienza costante nell'allenamento, per i quali è possibile aumentare progressivamente i carichi e introdurre esercizi più complessi.
- Avanzati: Atleti con oltre 12 mesi di esperienza e significativi miglioramenti in forza e potenza, per i quali si possono introdurre strategie di allenamento più complesse, comprese variazioni di intensità e volume.

Le raccomandazioni per l'allenamento della forza e della potenza sono riassunte nelle figure 32 e 33.

Recommendations for progression during resistance training for strength.*			
	Novice	Intermediate	Advanced
Muscle action	ECC and CON	ECC and CON	ECC and CON
Exercise choice	SJ and MJ	SJ and MJ	SJ and MJ
Intensity	50–70% 1RM	60–80% 1RM	70–85% 1RM
Volume	1–2 sets × 10–15 reps	2–3 sets × 8–12 reps	≥3 sets × 6–10 reps
Rest intervals (min)	1	1–2	2–3
Velocity	Moderate	Moderate	Moderate
Frequency (d·wk <sup>-1</sup> )	2–3	2–3	3–4

\*ECC = eccentric; CON = concentric; SJ = single joint; MJ = multi-joint; 1RM = 1 repetition maximum; rep = repetition.

Figura 32-Raccomandazioni per l'allenamento di forza - Faigenbaum et al. (2009)

Recommendations for progression during resistance training for power.*			
	Novice	Intermediate	Advanced
Muscle action	ECC and CON	ECC and CON	ECC and CON
Exercise choice	MJ	MJ	MJ
Intensity	30–60% 1RM VEL	30–60% 1RM VEL 60–70% 1RM STR	30–60% 1RM VEL 70 to ≥80% 1RM STR
Volume	1–2 sets × 3–6 reps	2–3 sets × 3–6 reps	≥3 sets × 1–6 reps
Rest intervals (min)	1	1–2	2–3
Velocity	Moderate/fast	Fast	Fast
Frequency (d·wk <sup>-1</sup> )	2	2–3	2–3

\*ECC = eccentric; CON = concentric; MJ = multi-joint; 1RM = 1 repetition maximum; VEL = velocity; STR = strength; rep = repetition.

Figura 33-Raccomandazioni per l'allenamento di potenza - Faigenbaum et al. (2009)

Lesinski et al. (2016) hanno condotto una revisione sistematica e una meta-analisi per quantificare gli effetti specifici di età, sesso, sport e tipo di allenamento sulle prestazioni fisiche, e per caratterizzare le relazioni dose-risposta dei parametri di allenamento che potrebbero massimizzare i miglioramenti delle prestazioni fisiche nei giovani atleti. In aggiunta alle

precedenti e complete raccomandazioni della NSCA (Faigenbaum et al., 2009), verranno di seguito fornite ulteriori note integrative e complementari basate sulla ricerca di Lesinski et al. (2016), con l'obiettivo di ottimizzare ulteriormente l'approccio all'allenamento della forza nei giovani.

I risultati mostrano che la forza muscolare ha mostrato miglioramenti moderati (SMDwm = 1,09), con risultati migliori nei protocolli di alta qualità (SMD = 1,07). Il salto verticale ha beneficiato in modo significativo dall'allenamento (SMDwm = 0,80), così come lo sprint lineare e l'agilità, con effetti moderati rispettivamente di (SMDwm = 0,58) e (SMDwm = 0,68). Anche le prestazioni specifiche per lo sport sono migliorate moderatamente (SMDwm = 0,75), con un miglioramento maggiore nei protocolli di alta qualità (SMDwm = 1,73).

La durata dell'allenamento ha influenzato i risultati: programmi più lunghi, superiori a 23 settimane, hanno prodotto aumenti significativi della forza muscolare (SMDwm = 3,40) e dell'agilità (SMDwm = 1,31), mentre un periodo di 9-12 settimane ha portato ai maggiori miglioramenti nel salto verticale (SMDwm = 1,20). Per quanto riguarda la frequenza dell'allenamento, non sono state rilevate differenze significative tra 1, 2 o 3 sessioni settimanali. L'allenamento ad alta intensità, con un carico dell'80-89% di 1RM, ha generato i miglioramenti più rilevanti nella forza muscolare (SMDwm = 2,52).

Il volume ottimale per migliorare la forza muscolare è risultato essere di quattro serie per esercizio (SMDwm = 0,79), mentre per le prestazioni specifiche dello sport, lo stesso volume ha prodotto i migliori risultati (SMDwm = 1,84). Anche per lo sprint lineare, tre o quattro serie per esercizio si sono dimostrate più efficaci (SMDwm = 0,95). Il numero di ripetizioni ottimale per serie è stato di 6-8 per i maggiori guadagni di forza (SMDwm = 2,42), mentre per le prestazioni specifiche con esercizi pliometrici, 3-5 o 9-12 ripetizioni per serie sono risultate ideali. Infine, un intervallo di riposo di 3-4 minuti tra le serie ha prodotto i miglioramenti più significativi nella forza muscolare (SMDwm = 2,09).

Quali raccomandazioni devono essere considerate durante la fase di sviluppo puberale per ottimizzare l'allenamento e il progresso fisico degli atleti giovani?

Pastor et al. (2023) hanno analizzato gli effetti delle variabili dell'allenamento della forza sugli adattamenti morfologici e/o neuromuscolari in 604 bambini prepuberali (473 maschi e 131 femmine; età,  $10,02 \pm 0,75$ ), tutti classificati come stadio Tanner I.

Nei maschi prepuberi, gli interventi di allenamento della forza della durata di 8-12 settimane, una periodizzazione lineare ed una frequenza di 2 giorni a settimana di allenamento hanno

mostrato un aumento significativo della forza muscolare rispetto agli altri interventi. (Figura 34)

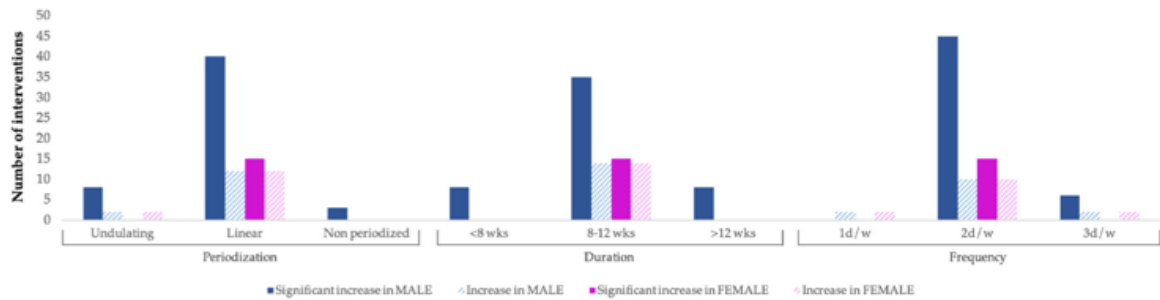


Figura 34- Pastor et al. (2023)

Nelle figure 35 e 36, osserviamo come l'intensità moderata (60–80% 1 RM), il volume basso (18–278 set/reps/exercise), l'alta velocità di movimento (max effort), intervalli di riposo compresi tra 1 e 2 minuti o superiori ai 2 minuti, e l'utilizzo di esercizi multiarticolari, abbiano avuto un effetto significativamente maggiore rispetto ad altri interventi. In misura minore, anche l'uso di macchine e la pliometria ha contribuito a miglioramenti significativi.

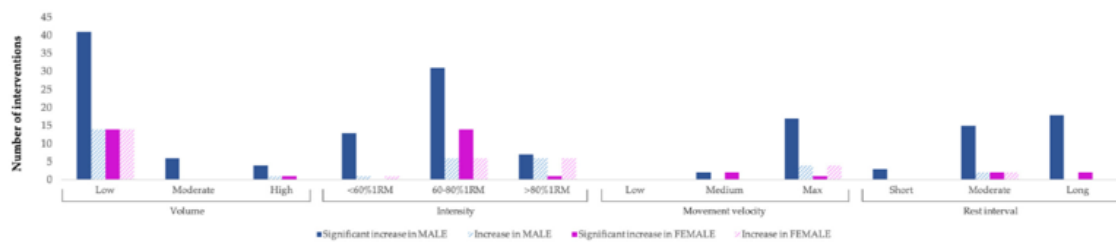
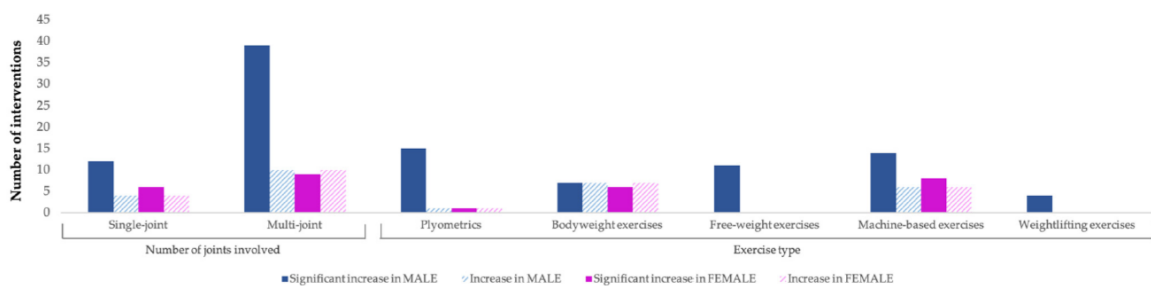


Figura 35– Pastor et al. (2023)



(c)

Figura 36 – Pastorate et al. (2023)

Per quanto riguarda gli effetti delle variabili di allenamento di forza sulla capacità di salto, i risultati mostrano che i programmi con una durata compresa tra 8 e 12 settimane, una frequenza di 2 giorni a settimana, un volume basso (18–278 set/reps/exercise), velocità massima di

esecuzione, esercizi multiarticolari ed esercizi pliometrici hanno prodotto aumenti significativamente maggiori nei ragazzi. (Figura 37)



Figura 37 -Pastor et al. (2023)

Infine, gli effetti delle variabili di allenamento di forza sulla capacità di sprint mostrano, nei ragazzi, risultati simili a quelli osservati per il salto. Tuttavia, aumenti significativi sono stati riscontrati con una frequenza di allenamento sia di 2 giorni a settimana sia di 3 giorni a settimana.

Un'ultima considerazione, oggetto di numerose critiche ed attenzioni, riguarda gli esercizi di sollevamento pesi, di potenza e l'adozione di metodi misti nell'allenamento giovanile.

McQuilliam et al. (2020) hanno effettuato una review narrativa ed analizzato diversi studi che avessero trattato queste metodologie di allenamento.

Per quanto riguarda il sollevamento pesi (WL), esso rappresenta una metodologia di allenamento altamente efficace per lo sviluppo della forza e della potenza muscolare, qualità

essenziali per la performance in numerosi sport, in particolare quelli che richiedono azioni esplosive come il salto e lo sprint.

Gli esercizi principali del WL includono lo slancio (clean and jerk), lo strappo (snatch), le loro varianti come il power clean e power snatch, le versioni hang clean e hang snatch, lo stacco da terra (deadlift) e le sue varianti, gli squat (back squat e front squat), e i movimenti di spinta sopra la testa come il push press e push jerk.

Sebbene la ricerca nel campo del sollevamento pesi nelle popolazioni giovanili sia ancora limitata, gli studi esistenti suggeriscono che questo tipo di allenamento possa offrire benefici significativi a tutti i livelli di maturazione biologica, quando viene implementato e supervisionato in maniera appropriata.

Secondo la review di McQuilliam et al. (2020), il sollevamento pesi ha mostrato di migliorare il reclutamento delle unità motorie e di aumentare il tasso di sviluppo della forza (RFD). Questo tipo di allenamento si allinea bene con le richieste esplosive di molti sport, in particolare per il salto e lo sprint. Studi comparativi, in popolazioni giovanili, tra sollevamento pesi ed allenamento con i pesi tradizionale non hanno rilevato differenze significative negli aumenti di accelerazione, sprint e salto verticale CMJ, ma il sollevamento pesi ha mostrato un probabile beneficio maggiore nel migliorare la distanza del salto orizzontale. Inoltre, ha prodotto miglioramenti più significativi in forza e potenza rispetto all'allenamento pliometrico (PLYO) in giovani atleti.

Il sollevamento pesi ha portato a miglioramenti della forza e della potenza, probabilmente grazie a una maggiore attivazione volontaria neuromuscolare dei muscoli agonisti e a una ridotta co-attivazione dei muscoli antagonisti, come evidenziato dall'aumento della rigidità delle gambe. Questi adattamenti neurali sono risultati più benefici per la performance in attività esplosive rispetto all'allenamento con i pesi tradizionale.

Per i giovani atleti, si consiglia di iniziare con esercizi fondamentali di forza come squat e affondi, e successivamente integrare successivamente con varianti di clean e snatch. Questo approccio progressivo aiuta a consolidare le tecniche fondamentali e a massimizzare i guadagni di forza e potenza.

Per quanto riguarda l'allenamento della potenza, McQuilliam et al. (2020) hanno evidenziato alcuni punti importanti, in base alla sua review, per periodizzare questa metodologia in base allo status puberale. Per atleti pre-PHV, si raccomanda di includere esercizi a basso carico e alta velocità per migliorare la picco-potenza, sfruttando al massimo gli adattamenti neurali. Questo tipo di allenamento è ideale nelle prime fasi dello sviluppo quando gli adattamenti morfologici

sono ancora limitati. Con l'avanzare dell'età e dello sviluppo fisico, l'allenamento di picco-potenza a basso carico diventa meno efficace (McQuilliam et al., 2020). McQuilliam et al. (2020) raccomandano di introdurre allenamenti di forza ad alta intensità (oltre l'80% 1RM) per migliorare la produzione di forza e ottimizzare la picco-potenza negli atleti più maturi. Post-PHV, i guadagni nella picco-potenza derivano principalmente da un aumento della forza muscolare. L'allenamento di picco-potenza non dovrebbe essere applicato in isolamento per periodi prolungati. Per massimizzare i guadagni di forza e potenza, è necessario bilanciare l'allenamento a picco-potenza con sessioni ad alta intensità, soprattutto negli atleti post-PHV, dove l'aumento della forza muscolare diventa cruciale.

Infine, McQuilliam et al. (2020) hanno passato in rassegna il metodo misto, o metodo combinato (complex training), come metodologia di allenamento in età giovanile.

Ha evidenziato che i metodi di allenamento combinato, che integrano squat posteriore, salti con carico (SJ/CMJ) e pliometria (PLYO), mostrano risultati significativamente migliori nella performance di sprint rispetto all'uso isolato di uno di questi metodi.

In particolare, citando una meta-analisi (Seitz et al., 2014) ha rivelato che l'effetto maggiore ( $ES = -1,20$ ) è stato ottenuto quando questi metodi sono stati utilizzati insieme, rispetto al solo squat posteriore ( $ES = -0,81$ ) o salti con carico ( $ES = -0,29$ ). Questi risultati supportano l'uso di un approccio integrato per massimizzare i miglioramenti nella forza e potenza negli atleti.

Un'altra osservazione importante, citando Seitz et al., (2014) riguarda l'efficacia dell'allenamento combinato di carichi ad alta intensità ( $>85\%$  1RM), media intensità (60–84,9% 1RM) e bassa intensità ( $<40\%$  1RM). La combinazione di carichi ad intensità variabile ha mostrato di produrre maggiori miglioramenti nella performance di sprint rispetto all'uso di carichi in isolamento.

È stato dimostrato che l'efficacia dell'allenamento varia a seconda dello stato maturativo degli atleti. McQuilliam et al. (2020) hanno citato studi che hanno osservato come il metodo pliometrico (PLYO) era più efficace nei miglioramenti di salto e sprint per gli atleti pre-PHV, mentre il metodo combinato era più efficace post-PHV per migliorare la forza massima e l'accelerazione. Questo conferma il fatto che gli atleti pre-PHV beneficiano maggiormente di metodi che sfruttano la velocità e la reattività muscolare, mentre quelli post-PHV rispondono meglio a stimoli di forza più elevati a causa della maggiore massa muscolare derivante dalla maturazione.

Senza dimenticare che è essenziale sviluppare la forza prima di passare all'allenamento della potenza. Gli allenatori dovrebbero iniziare con un periodo di costruzione della forza attraverso

esercizi di carichi progressivi e successivamente integrare esercizi balistici per ottimizzare il trasferimento della forza in potenza esplosiva (Figura 38). Questo approccio graduale aiuterà a massimizzare i guadagni in termini di performance atletica dinamica.

Chronological age (years)	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	>21
Biological age	Pre-PHV			PHV			Post-PHV						
Functional movements	FOUNDATIONAL MOVEMENTS												
Training focus	TECHNICAL DEVELOPMENT				INTRODUCTION TO LOAD				HIGH-INTENSITY LOADING				
Weightlifting	INCREASE IN TRAINING INTENSITY												
Traditional resistance training	INCREASE IN TRAINING INTENSITY												
Recommendations	General strength Emphasis on functional movements 1-3 sets x 8-10 reps			Strength development increases in training intensity 2-3 sets x 6-8 reps 70-80% 1RM				High intensity resistance training Traditional and weightlifting movements 3-4 sets x 1-6 reps 70-100% 1RM					

Figura 38 - Raccomandazioni basate sull'evidenza per lo sviluppo della forza e della potenza all'interno di un piano olistico di sviluppo atletico a lungo termine per atleti giovani - McQuilliam et al. (2020)

## 7. Identificazione del talento e maturità puberale: modelli tradizionali ed un modello longitudinale multidimensionale

La ricerca sull'identificazione e lo sviluppo del talento nei giovani atleti ha guadagnato grande attenzione negli ultimi decenni, soprattutto nel contesto di sport altamente competitivi come il calcio. Tuttavia, nonostante la crescente popolarità di questi programmi, rimane un notevole dibattito su come il talento debba essere definito e identificato, e su quali siano i modelli più efficaci per prevedere il successo a lungo termine. In questo contesto, i modelli tradizionali, spesso basati su studi trasversali, si sono rivelati limitati nella loro capacità di prevedere con precisione quali giovani atleti raggiungeranno l'eccellenza in età adulta.

La principale problematica dei modelli tradizionali di identificazione del talento risiede nella loro incapacità di tenere conto della natura dinamica e multidimensionale del talento sportivo. Questi approcci si concentrano spesso su misurazioni statiche delle caratteristiche puramente fisiche o antropometriche, assumendo erroneamente che tali attributi rimangano costanti durante il processo di maturazione. Tuttavia, durante l'adolescenza, il talento si sviluppa in maniera instabile e non lineare, influenzato da variabili come la maturazione biologica, le influenze ambientali e i programmi di allenamento (Williams, 2023). Di conseguenza, le valutazioni basate su misurazioni singole possono escludere precocemente atleti promettenti,

in particolare quelli con maturazione tardiva, che spesso manifestano le loro potenzialità solo in età più avanzata.

Il tasso di maturazione è un fattore cruciale che influenza le capacità fisiche e le performance atletiche (Malina et al., 2004). In particolare, è stato dimostrato che i giovani con maturazione precoce tendono a eccellere in sport che richiedono forza, altezza o velocità, come il canottaggio o il basket, mentre coloro che maturano più tardi possono essere svantaggiati nei test di performance durante le fasi prepuberali (Vaeyens et al., 2008). Questo fenomeno evidenzia l'importanza di adottare un approccio che non si basi esclusivamente sull'età cronologica, ma che consideri lo stato di maturità biologica degli atleti. Un approccio più dinamico e flessibile potrebbe evitare la classificazione errata e la conseguente esclusione di talenti potenzialmente validi.

Inoltre, i modelli tradizionali tendono a concentrarsi su un numero limitato di variabili, ignorando spesso le componenti psicologiche e cognitive-percettive, che si sono dimostrate predittori significativi di successo nel lungo termine. Il talento sportivo è il risultato di un'interazione complessa tra fattori fisici, tecnici, cognitivi e psicologici, e un approccio multidimensionale è essenziale per comprendere questa complessità.

L'adozione di un modello longitudinale multidimensionale come quello di Gagné (2020) potrebbe offrire una risposta a queste limitazioni, proponendo una visione più completa e dinamica dell'identificazione del talento (figura 39). Questo modello riconosce l'importanza di variabili multiple e interconnesse, che includono fattori genetici, ambientali, fisici e psicologici, oltre a considerare la maturità biologica come una componente chiave nel processo di valutazione. Piuttosto che concentrarsi su una fotografia statica della performance attuale, il modello longitudinale enfatizza il monitoraggio continuo dello sviluppo degli atleti, permettendo di identificare il potenziale nascosto in coloro che potrebbero non eccellere nelle fasi iniziali.

Il fenomeno della compensazione è un esempio chiave di come il talento possa emergere attraverso combinazioni uniche di abilità e attributi. In molti sport, l'eccellenza può essere raggiunta in modi diversi e non standardizzati, permettendo agli atleti di compensare carenze in una determinata area con punti di forza in altre. Questo concetto sottolinea l'importanza di non escludere individui che potrebbero non rientrare nei parametri standardizzati di prestazione, ma che potrebbero possedere altre qualità fondamentali per il successo. Il talento è un concetto complesso e di difficile definizione univoca, poiché il dibattito sul contributo relativo tra natura

(dotazione genetica) e cultura (influenze ambientali) rimane aperto e controverso. È quindi necessario chiarire prima cosa si intenda esattamente per "talento".

Vaeyens et al. (2008) citando il modello differenziato di dote e talento (DMGT) di Gagné rappresenta un approccio promettente per chiarire la distinzione tra "dotazione" (abilità innate) e "talento" (abilità sviluppate), fornendo un quadro concettuale utile per comprendere come il talento emerga attraverso il processo di sviluppo. (Figura 40)

Il DMGT distingue tra due concetti fondamentali:

- **Dotazione:** Si riferisce al possesso di abilità naturali (innate), definite anche come attitudini. Queste abilità naturali si manifestano nei bambini fin dai primi anni di vita e possono essere osservate nei contesti di apprendimento precoce. Secondo il DMGT, la dotazione si colloca all'interno del 10% superiore della popolazione per una determinata fascia di età. Le attitudini includono capacità nei quattro domini principali proposti dal modello: intellettuale, creativo, socio-affettivo e sensomotorio. Nell'ambito sportivo, il dominio sensomotorio, che riguarda le abilità fisiche e motorie, è particolarmente rilevante. Tuttavia, Gagné sottolinea che le abilità sportive non si limitano solo al dominio fisico, ma includono anche aspetti intellettuali, creativi e socio-affettivi, come la leadership e la risoluzione dei problemi.
- **Talento:** Indica la padronanza di abilità sviluppate attraverso la pratica, l'apprendimento e l'allenamento. Il talento rappresenta il prodotto finale del processo di sviluppo ed è definito dal DMGT come l'abilità di eccellere in un campo specifico, con l'individuo che si colloca tra il 10% migliore dei suoi pari attivi in quel campo. Nel contesto sportivo, questo significa che l'atleta ha acquisito competenze e abilità che lo distinguono tra i migliori nel suo sport.

Il DMGT descrive il processo di sviluppo del talento come una trasformazione delle attitudini innate (dotazione) in abilità altamente sviluppate (talento). Questo processo non avviene in modo lineare, ma è influenzato da numerosi fattori che agiscono in modo dinamico e multidimensionale. In particolare, il modello evidenzia l'importanza della pratica intensiva, che svolge un ruolo cruciale nel perfezionamento delle abilità. La famosa teoria di Ericsson (1997) indicò che sono necessarie almeno 10,000 ore (circa 10 anni) di pratica sistematica e focalizzata per raggiungere l'eccellenza in un determinato campo. Tuttavia, la quantità di pratica non è sufficiente da sola: anche la qualità e la tipologia di attività svolte giocano un ruolo determinante.

Il modello include sei componenti fondamentali che interagiscono dinamicamente durante il processo di sviluppo del talento:

- **Abilità naturali (dotazione):** Le capacità innate, che costituiscono il punto di partenza per il processo di sviluppo. Queste abilità sono in parte genetiche e si manifestano nei domini intellettuale, creativo, socio-affettivo e sensomotorio.
- **Catalizzatori intrapersonali:** Questi includono caratteristiche individuali che possono facilitare o ostacolare la trasformazione della dotazione in talento. Tra i fattori intrapersonali rientrano la motivazione, la perseveranza, l'autodisciplina, la personalità e la volizione. Questi fattori determinano in gran parte l'impegno e la determinazione dell'atleta nel raggiungere il successo.
- **Catalizzatori ambientali:** Si riferiscono a fattori esterni che influenzano lo sviluppo del talento, come l'ambiente familiare, le risorse a disposizione, la qualità dell'allenamento, il supporto da parte di allenatori e l'accesso a programmi sportivi strutturati. Anche la cultura sportiva e il livello di competizione giocano un ruolo fondamentale nel creare le condizioni ottimali per il successo.
- **Casualità:** Il DMGT riconosce che eventi imprevedibili o fuori dal controllo dell'individuo possono influire sul processo di sviluppo del talento. Fattori come infortuni, opportunità non pianificate, o variabili socioeconomiche possono agire come catalizzatori positivi o negativi. Il modello sottolinea l'importanza di essere preparati a gestire questi fattori, ad esempio attraverso la prevenzione degli infortuni.
- **Attività di sviluppo:** Si riferiscono a tutte le attività che l'atleta svolge per migliorare le sue abilità, incluse l'allenamento, la pratica e la partecipazione a competizioni. Queste attività sono fondamentali per trasformare la dotazione in talento e devono essere adeguatamente strutturate e intensificate nel corso del tempo.
- **Risultati:** Il talento è il risultato finale del processo di trasformazione. Quando le abilità innate vengono coltivate attraverso un allenamento sistematico, l'individuo raggiunge un livello di eccellenza nel suo campo di attività, che lo colloca tra i migliori.

Il DMGT è particolarmente utile per comprendere il talento sportivo, in quanto integra i fattori genetici e ambientali nel processo di sviluppo, e sottolinea l'importanza delle capacità multidimensionali (non solo fisiche) nell'eccellenza sportiva. Il modello suggerisce che, per identificare il talento negli atleti, è necessario considerare non solo le abilità attuali, ma anche il potenziale di crescita, la capacità di apprendere rapidamente nuove abilità e l'influenza dell'ambiente circostante.

Uno dei principali contributi del DMGT alla selezione del talento nel calcio è l'attenzione alla maturità biologica. Nel calcio giovanile, molti calciatori con maturazione fisica precoce tendono a essere favoriti nei programmi di sviluppo, poiché possiedono vantaggi immediati in termini di forza, altezza e velocità. Tuttavia, secondo il DMGT, la dotazione fisica può manifestarsi in modo diverso tra i ragazzi, poiché non tutti maturano fisicamente nello stesso momento. Utilizzare il DMGT implica includere nel processo di selezione strumenti per valutare lo stato di maturazione biologica (come l'età scheletrica), permettendo agli allenatori di identificare il potenziale di crescita fisica e funzionale anche in giovani calciatori che potrebbero essere più piccoli o meno sviluppati fisicamente, ma che presentano un'elevata capacità di apprendere e migliorare nel tempo. Esso incoraggia una valutazione più completa e olistica del talento, che non si limita alle sole variabili fisiche. Nella selezione dei giovani calciatori, le abilità tecniche (come il controllo di palla, il dribbling e il passaggio) e tattiche (comprensione del gioco, capacità decisionale) dovrebbero avere un ruolo centrale. Spesso, i giovani atleti con maggiori capacità tattiche, che riescono a comprendere rapidamente situazioni di gioco e a prendere decisioni appropriate, possono essere trascurati a favore di giocatori fisicamente più dotati ma meno sviluppati dal punto di vista cognitivo-tattico. Il DMGT permette di considerare il talento come il risultato di una complessa interazione tra abilità innate e apprendimenti acquisiti, suggerendo che calciatori con un'elevata dotazione tecnico-tattica possano compensare una maturità fisica ritardata e avere un notevole potenziale di sviluppo. Invece di basarsi esclusivamente sulle prestazioni attuali, che possono essere influenzate da una maturazione precoce, la selezione dei talenti dovrebbe considerare la capacità del giovane calciatore di apprendere nuove abilità e adattarsi rapidamente a nuove situazioni di gioco. Questo approccio sposta l'attenzione dalla pura prestazione fisica a una valutazione più dinamica, che premia i giocatori con una maggiore facilità di apprendimento, creatività e intelligenza calcistica, aspetti essenziali per eccellere a lungo termine.

Inoltre, i modelli di identificazione del talento si basano esclusivamente sull'età cronologica, senza tenere conto della maturità biologica. Per ridurre il rischio di errori di selezione, è fondamentale includere la maturità biologica nelle valutazioni del talento (Vaeyens et al., 2008). L'adozione di metodi non invasivi per misurare la maturità biologica dovrebbe essere integrata nei modelli di identificazione, consentendo una valutazione più accurata del potenziale futuro dei giovani atleti, oltre alle loro prestazioni attuali.

Le abilità percettivo-cognitive e tecniche rivestono un ruolo cruciale nell'identificazione del talento negli sport di squadra, come il calcio. Vaeyens et al. (2008) citano studi che dimostrano

che queste abilità hanno un maggiore potere discriminante rispetto ai semplici profili antropometrici e fisiologici, soprattutto man mano che gli atleti progrediscono verso livelli di competizione più alti. In particolare, le abilità percettivo-cognitive sono integrate senza soluzione di continuità durante la performance, risultando fondamentali per la performance ottimale in contesti complessi e dinamici.

Nonostante ciò, molte ricerche sull'identificazione del talento tendono a trascurare l'inclusione di predittori psicologici, percettivo-cognitivi e tecnici. È essenziale, dunque, che questi fattori siano inclusi nei modelli di identificazione del talento per garantire un approccio più completo e affidabile.

Si deve iniziare a pensare allo sviluppo di misure di performance che simulino meglio le reali condizioni di competizione. Protocolli di test più realistici possono migliorare la capacità predittiva dei modelli di identificazione, consentendo di catturare con maggiore precisione le abilità richieste in situazioni di gara. Tuttavia, a causa della complessità e della varietà dei fattori che contribuiscono al talento sportivo, i modelli che correlano singoli componenti con il successo in un dominio possono avere successo limitato. La sfida per i ricercatori è sviluppare strumenti che possano valutare in modo obiettivo la "performance totale" in contesti di competizione reale. L'uso di tecnologie avanzate e sistemi di misurazione più sofisticati potrebbe rappresentare un passo avanti verso il raggiungimento di questo obiettivo.

Inoltre, il tasso di successo nell'identificazione del talento varia in base alla natura dello sport. Gli sport che dipendono da una o due variabili principali (es. forza o velocità) hanno un maggiore tasso di predittività rispetto agli sport che richiedono una combinazione di abilità diverse. Gli sport "chiusi", come il canottaggio e il sollevamento pesi, in cui le condizioni esterne influiscono meno sulla performance, consentono previsioni più accurate rispetto agli sport "aperti", come il calcio o l'hockey, dove l'ambiente è più dinamico e imprevedibile.

Poiché ogni sport ha fasi di sviluppo e requisiti di specializzazione differenti, i modelli di identificazione del talento devono essere specifici per ciascuna disciplina. Gli sport che richiedono una specializzazione precoce devono avere approcci diversi rispetto a quelli che prevedono un picco di performance in età più avanzata.

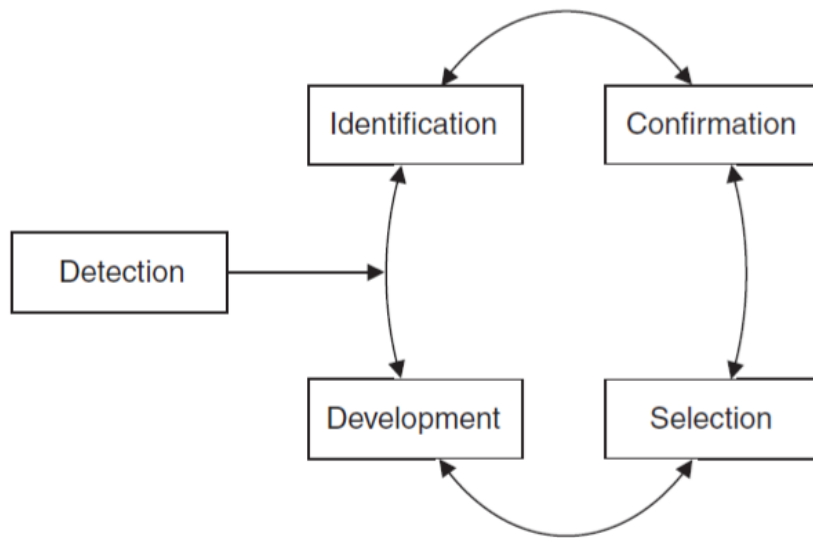
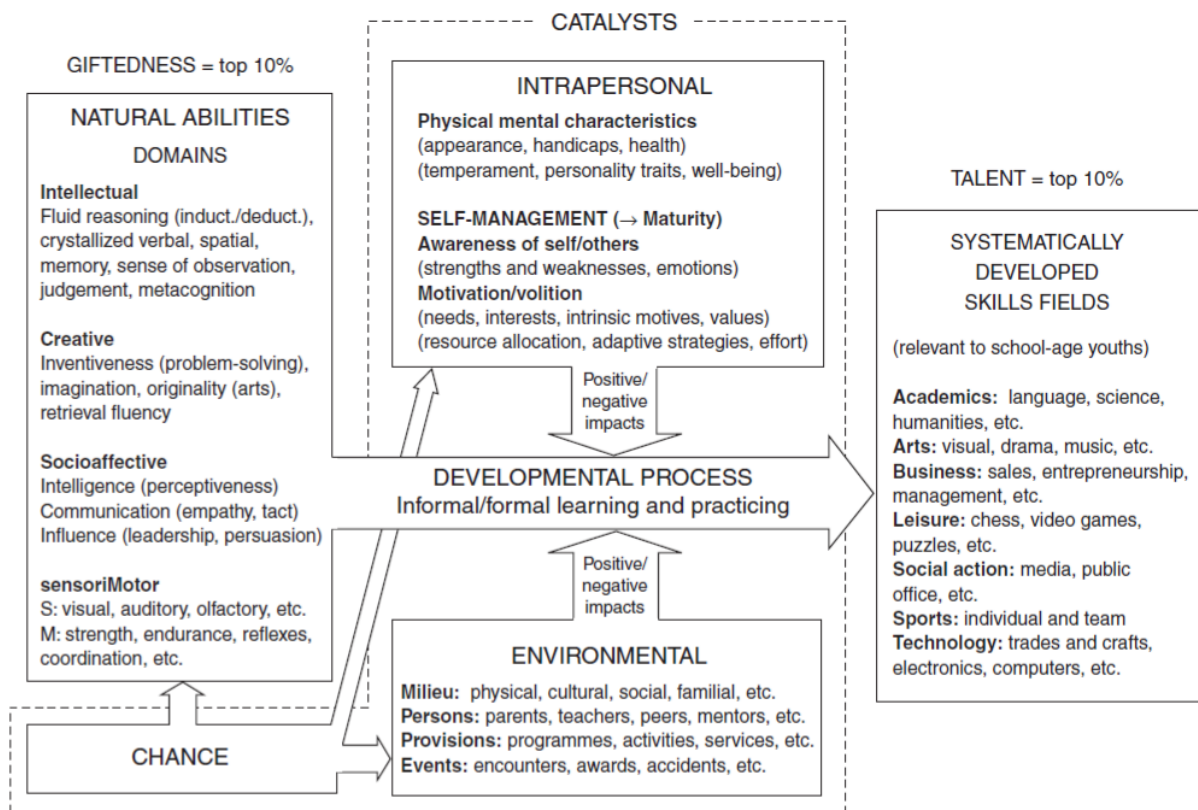


Figura 39 -Fasi chiave nel processo di identificazione e sviluppo dei talenti - Vaeyens et al. (2008)



The Differentiated Model of Giftedness and Talent (reproduced from van Rossum and Gagné,<sup>[69]</sup> with permission of Prufrock Press Inc., <http://www.prufrock.com>. Copyright © 2005). **deduct.** = deduction; **induct.** = induction; **M** = motor; **S** = sensory.

Figura 40– Modello DMGT - Vaeyens et al. (2008)

In questo capitolo, è emerso chiaramente che i modelli tradizionali di identificazione del talento, spesso basati su misurazioni statiche e valutazioni a breve termine, risultano inadeguati per cogliere la complessità dello sviluppo del giovane atleta, soprattutto in uno sport multidimensionale come il calcio. L'approccio tradizionale tende a privilegiare vantaggi fisici immediati e prestazioni misurabili, ignorando aspetti cruciali come la maturità biologica e le abilità tecnico-tattiche che possono emergere in fasi successive dello sviluppo.

L'integrazione di un modello longitudinale multidimensionale, come suggerito da Vaeyens et al. (2008), permette una valutazione più dinamica e completa del talento, considerando non solo la prestazione attuale, ma anche il potenziale di crescita a lungo termine. Elementi chiave come la maturazione biologica, il tasso di apprendimento, le abilità percettivo-cognitive e l'ambiente di sviluppo devono essere parte integrante del processo di identificazione. Questo approccio riconosce l'importanza di considerare le variabili in evoluzione, evitando errori di selezione precoce che potrebbero escludere talenti emergenti con maturazione tardiva o con potenziale in aree tecnico-tattiche meno evidenti nelle fasi iniziali.

Inoltre, l'inclusione di metodologie basate su disegni longitudinali e su compiti rappresentativi delle condizioni di competizione reale fornisce un quadro più realistico delle capacità degli atleti, aumentando l'affidabilità dei processi di identificazione e riducendo i rischi associati a previsioni a lungo termine. La combinazione di strumenti non invasivi per misurare la maturità biologica, insieme a una valutazione multidimensionale delle competenze tecniche e cognitive, rappresenta un miglioramento significativo rispetto ai modelli di identificazione tradizionali.

In conclusione, un approccio di identificazione del talento basato su un modello longitudinale e multidimensionale offre un metodo più efficace, equo e scientificamente solido per sostenere lo sviluppo dei giovani atleti, garantendo che nessun potenziale talento venga trascurato o escluso prematuramente. Questo modello può contribuire a creare una pipeline di talenti meglio preparati per affrontare le sfide del livello senior, minimizzando i rischi legati alla deselection precoce e alla sovraenfaticizzazione delle prestazioni a breve termine.

8. Figure di sintesi: considerazioni fisiologiche e metodologiche per le diverse categorie puberali

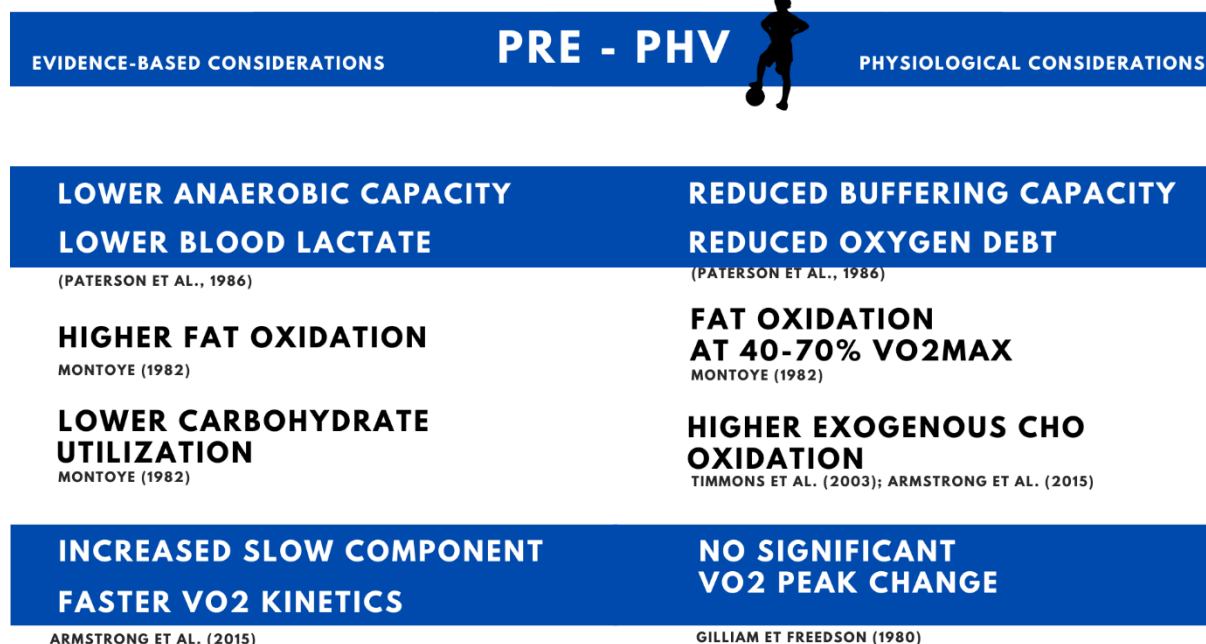


Figura 41 - Considerazioni fisiologiche nel Pre-PHV

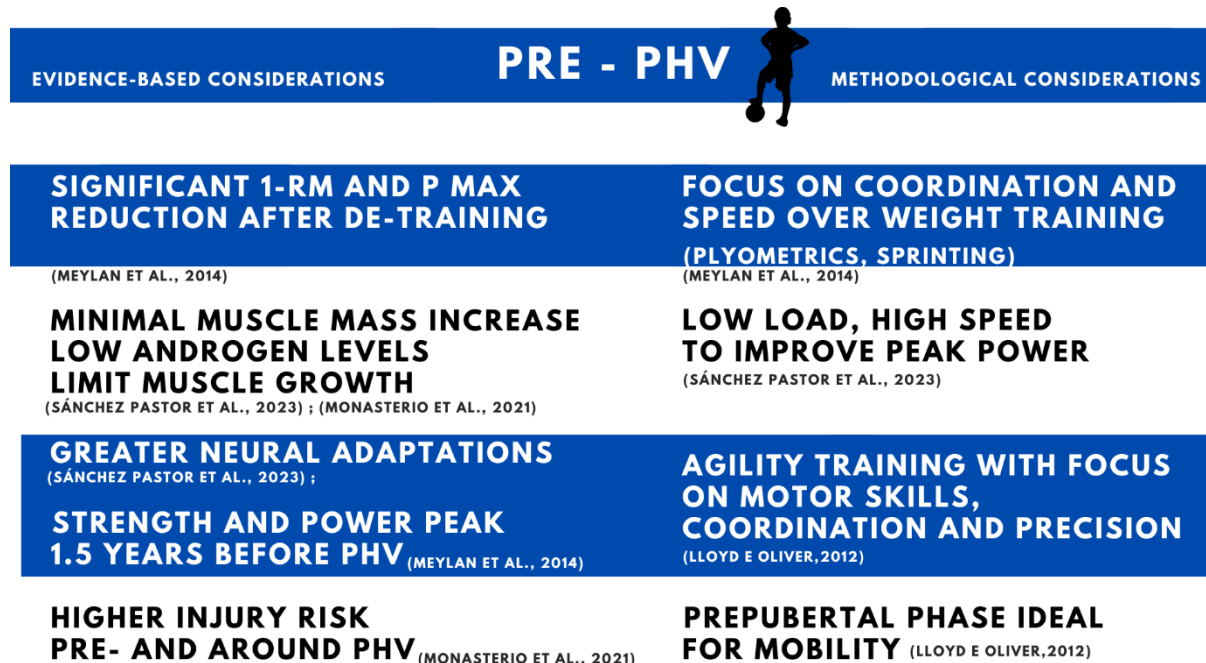


Figura 42 -Considerazioni metodologiche nel Pre-PHV

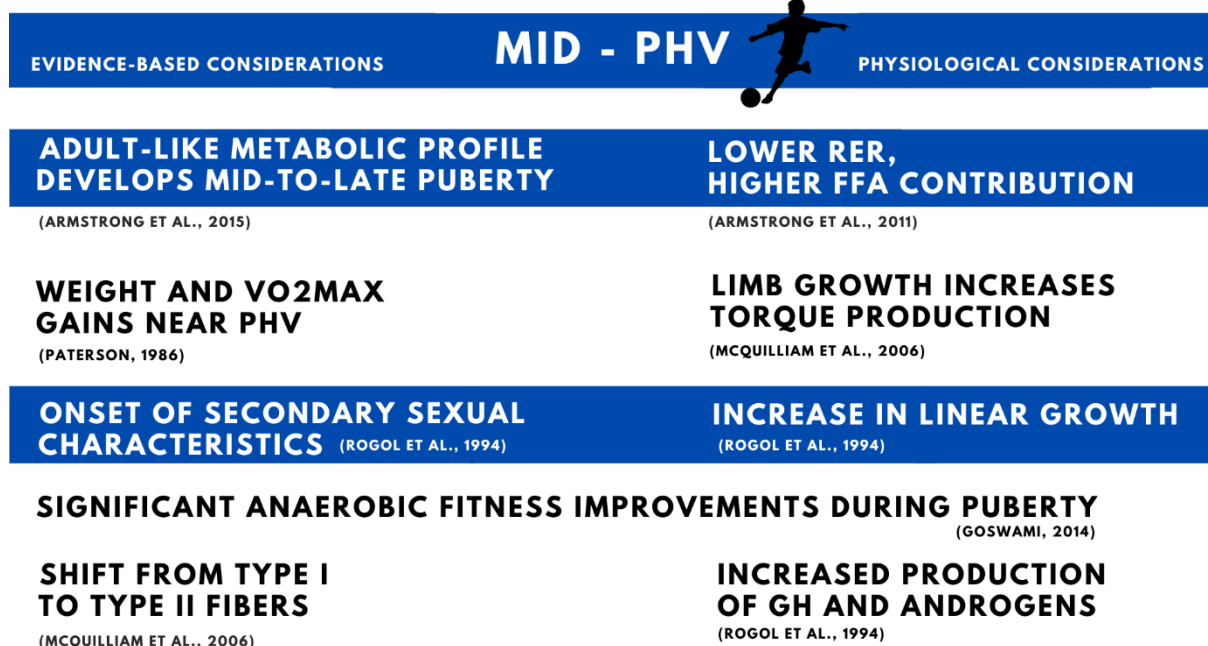


Figura 43 - Considerazioni fisiologiche nel Mid-PHV

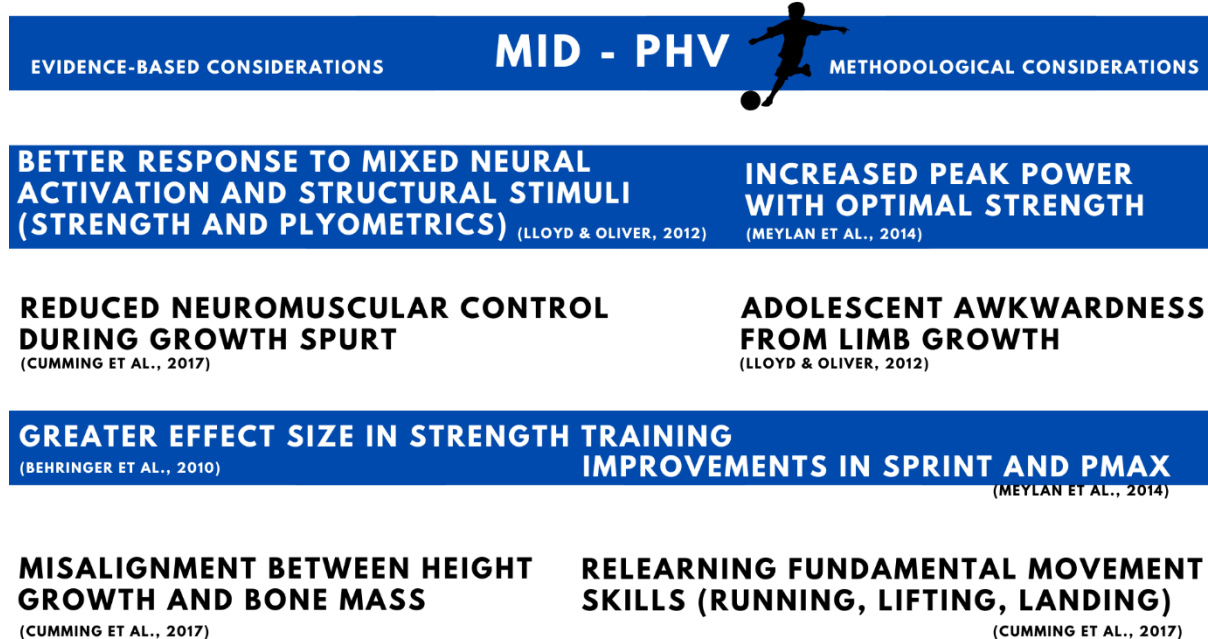


Figura 44- Considerazioni metodologiche nel Mid-PHV

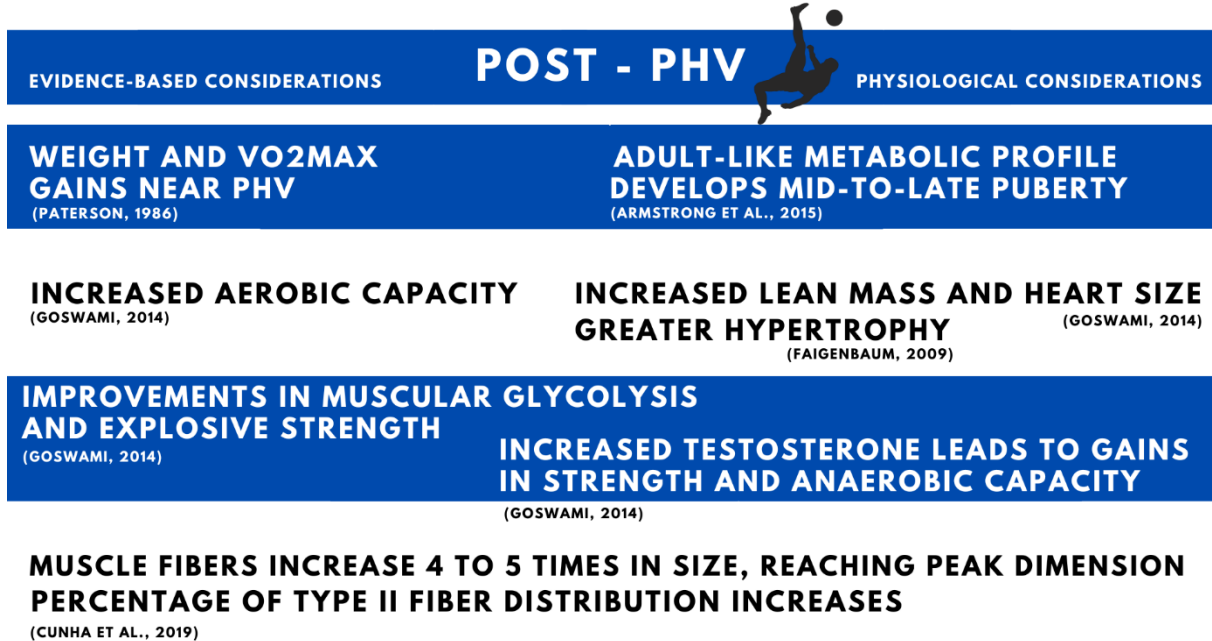


Figura 45- Considerazioni fisiologiche nel Post-PHV

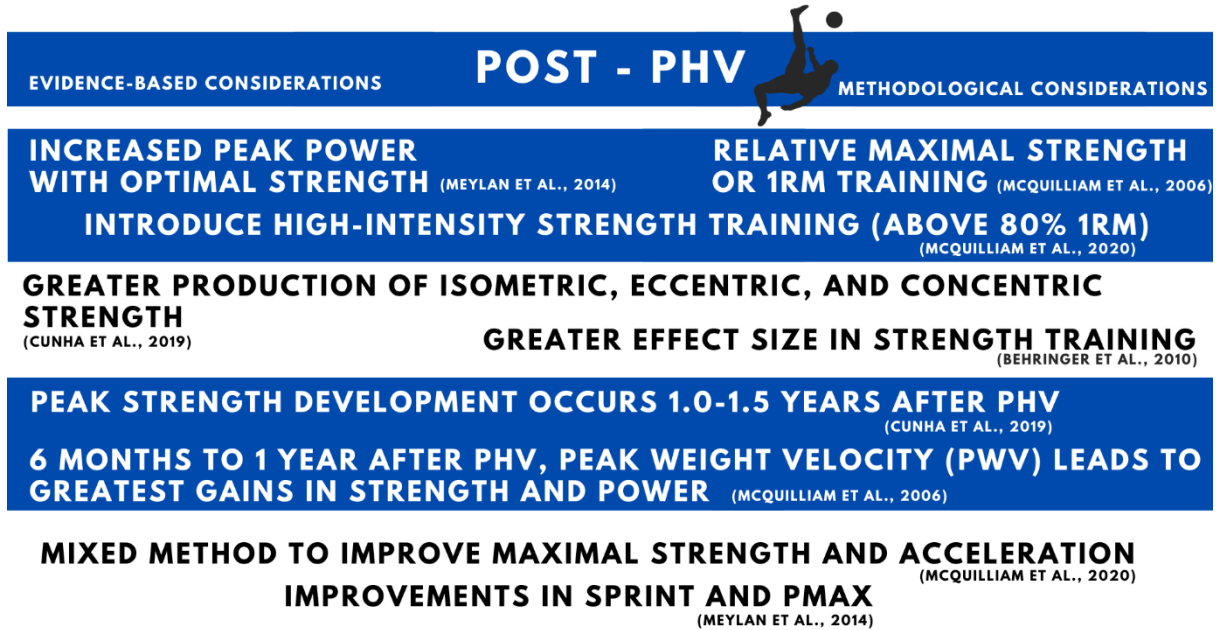


Figura 46- Considerazioni metodologiche nel Post-PHV

## 9. Conclusioni e prospettive

I risultati di questo dottorato, supportati dalla letteratura scientifica analizzata, consolidano l'importanza della valutazione della maturazione biologica, della mitigazione del RAE e dell'adozione di un modello longitudinale multidimensionale per il calciatore come fattori chiave nell'evoluzione delle performance e nei processi di selezione dei giovani atleti.

Gli Studi 1 e 2 hanno fornito evidenze fondamentali sull'importanza della maturità puberale nella performance dei giovani calciatori, mettendo in luce come lo sviluppo biologico influenzi non solo le capacità atletiche ma anche la selezione e l'organizzazione dell'allenamento.

I risultati hanno evidenziato la grande variabilità interindividuale nello stato puberale tra giovani atleti della stessa età cronologica: nello Studio 1, i partecipanti sono stati classificati come puberali precoci ( $n = 13$ ; 21%), puberali medi ( $n = 32$ ; 53%) e puberali tardivi ( $n = 16$ ; 26%); nello Studio 2, sono stati identificati 5 prepuberali (2%), 54 inizio puberali (21%), 109 metà puberali (42%), 87 avanzati puberali (34%) e 4 post-puberali (2%). Questo sottolinea l'importanza di utilizzare strumenti di valutazione semplici ed affidabili per determinare lo stato di maturità puberale di ciascun atleta.

L'impiego del PDS ha consentito di classificare lo stadio di maturazione di ciascun atleta in modo non invasivo e a costo zero, mettendo in luce una notevole variabilità inter-individuale all'interno delle squadre suddivise per età cronologica, sottolineando come l'età cronologica da sola non sia un indicatore sufficiente dello sviluppo biologico. Questo approccio si rivela particolarmente utile in contesti con risorse limitate o senza la presenza di specialisti qualificati per valutazioni più approfondite.

Inoltre, lo studio 1 ha evidenziato una correlazione significativa tra diverse misure dello stato puberale derivate dal PDS e "lavoro" nel test CMJ (intervallo  $r = 0,33-0,36$ ;  $p < 0,01$ ); lo studio 2, attraverso un'analisi ANOVA, ha mostrato un effetto significativo dello stato puberale sulla performance nel CMJ, con valori progressivamente crescenti in base allo stadio puberale (pre-puberale:  $24,4 \pm 2,9$  cm; inizio puberale:  $26,4 \pm 5,6$  cm; metà puberale:  $28,7 \pm 5,8$  cm; avanzato puberale:  $31,5 \pm 5,6$  cm; post-puberale:  $35,4 \pm 2,0$  cm; effetto principale:  $F_{(4,254)} = 9,244$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta^2_p = 0,127$ ), confermando un impatto diretto dello sviluppo puberale sulle capacità di salto verticale.

Il differente ritmo di maturazione pone così l'accento sulla necessità di includere, nelle valutazioni delle performance dei giovani calciatori, metodi che tengano conto dello stadio

puberale. La maturità biologica diventa così un termometro per lo sviluppo di metodologie di allenamento appropriate, e non solo un parametro di crescita fisica.

Identificare accuratamente lo stato puberale è cruciale per evitare errori nella programmazione dell'allenamento e nella valutazione delle prestazioni. Infatti, affidarsi esclusivamente all'età cronologica o a misure antropometriche potrebbe portare a sottovalutare o sovraccaricare atleti che si trovano in fasi diverse dello sviluppo, con possibili ripercussioni negative sul loro sviluppo fisico e psicologico.

Alla luce delle differenze nello sviluppo puberale, emerge la necessità di organizzare l'allenamento in forma individualizzata e longitudinale, rispettando i tempi e le fasi della crescita di ciascun atleta.

Tradizionalmente, le competizioni giovanili di calcio sono state organizzate in categorie di età annuali (ad esempio U10, U11, U12, ecc.) in cui gli atleti sono divisi in categorie per garantire una competizione leale e pari opportunità. Di conseguenza, nella stessa coorte può esserci una differenza di quasi 12 mesi tra atleti. Questa differenza di età cronologica tra i più giovani e i più anziani all'interno di una categoria di età è comunemente definita età relativa.

L'effetto dell'età relativa è problematico perché porta a una distribuzione sbilanciata delle date di nascita in molti sport, con una sovra rappresentazione degli atleti nati nella prima metà dell'anno di selezione. I risultati degli studi 1 e 2 confermano la letteratura esistente mostrando che la proporzione di giocatori nati nel primo trimestre dell'anno di selezione è molto più alta della proporzione di giocatori nati in tutti gli altri trimestri (50,85% nello studio 1; 40,9% nello studio 2).

L'analisi del Relative Age Effect, tuttavia, ha mostrato che non sempre esso rappresenta un vantaggio dal punto di vista prestativo o antropometrico. Al contrario, è emersa una bassa correlazione tra età cronologica, età relativa e capacità fisiche (risultati riassunti nelle tabelle 2,3,4 per lo Studio 1; tabella 8 e figura 4 per lo Studio 2).

Il RAE rappresenta un bias sistematico che favorisce i giocatori nati nei primi mesi dell'anno (Q1), conferendo loro un vantaggio apparente durante le prime fasi della carriera calcistica. Questo vantaggio è spesso dovuto alla maturità biologica precoce, che porta a una migliore prestazione fisica rispetto ai coetanei nati nei trimestri successivi, come evidenziato da una maggiore rappresentanza di questi atleti nei campionati giovanili e nelle squadre professionistiche. La letteratura scientifica citata evidenzia che il vantaggio iniziale dei giocatori nati nei primi trimestri dell'anno non si traduce necessariamente in un successo a lungo termine nel calcio professionistico adulto. Sebbene questi atleti siano selezionati più

frequentemente nelle prime fasi della carriera, i maturatori tardivi, nati nei quartili Q3 e Q4, mostrano una maggiore probabilità di raggiungere il livello d'élite, mentre i maturatori precoci tendono a sperimentare un plateau nelle loro prestazioni. Nel tempo, le abilità tecniche, cognitive e tattiche sviluppate dai maturatori tardivi tende a superare il vantaggio fisico dei precoci, rendendo meno rilevante il RAE con l'avanzare dell'età.

Per mitigare il RAE nei processi di selezione e formazione, è necessario adottare politiche che vadano oltre i semplici criteri cronologici. Strategie come il "bio-banding", che raggruppano gli atleti in base alla loro maturità biologica anziché all'età cronologica, potrebbero uniformare la competitività e garantire pari opportunità. Questo approccio, con tutte le sue limitazioni, aiuta a sviluppare le abilità degli atleti meno maturi senza penalizzarli per il loro ritardo di sviluppo, offrendo una soluzione per la crescita a lungo termine.

In aggiunta, la rotazione dei cut-off annuali o la creazione di squadre differenziate per quartile di nascita possono essere implementate nei club per organizzare competizioni interne tra giocatori suddivisi per classe puberale, piuttosto che per categoria anagrafica.

Sperimentare allenamenti personalizzati, come duelli 1vs1 in base alla classe puberale, oppure adattare le dimensioni del campo, le regole e il numero di partecipanti alle esercitazioni, potrebbe consentire di creare contesti adeguati allo stadio di maturazione di ciascun atleta. Altresì allenamenti condizionali individuali, basati sulle specifiche esigenze fisiologiche legate allo sviluppo puberale, rappresentano soluzioni efficaci per promuovere un approccio individualizzato nell'allenamento.

Per il futuro, si raccomanda l'adozione di protocolli di allenamento che tengano conto delle diverse fasi puberali, basandosi su linee guida consolidate, come quelle discusse nella letteratura di riferimento. Gli approfondimenti sulla fisiologia muscolare presentati in questa tesi dovrebbero fungere da punto di riferimento per selezionare i mezzi e i metodi di allenamento più adeguati a ciascuna fase di crescita, favorendo un approccio orientato al percorso di sviluppo complessivo piuttosto che ai soli risultati immediati. È cruciale, in questo contesto, evitare scorciatoie e superare i potenziali ostacoli. Tra le prime rientrano la specializzazione precoce e la selezione del talento basata su criteri esclusivamente fisici o antropometrici, mentre tra i secondi vi sono problematiche come gli infortuni da sovraccarico, problemi di salute derivanti da allenamenti e competizioni inadeguate, e l'abbandono precoce dell'attività sportiva.

Questo approccio rappresenta una strategia efficace per rispondere alle esigenze di crescita dei giovani atleti creando un ambiente sportivo che promuove l'apprendimento e lo sviluppo

personale. Si suggerisce l'integrazione della valutazione della classe puberale nei processi di selezione, tramite un modello longitudinale multidimensionale per l'identificazione del talento. Un modello che consideri la crescita e lo sviluppo nel tempo consentirebbe di superare i limiti di una selezione basata esclusivamente sull'età cronologica, favorendo una comprensione più profonda dei percorsi di sviluppo individuali. Invece di focalizzarsi sul RAE, il focus dovrebbe essere su una visione globale delle caratteristiche psicologiche, tecnico-tattiche e delle prospettive di sviluppo a lungo termine, promuovendo una maggiore equità nella selezione e nelle opportunità di crescita nei club.

Adottare un approccio che consideri il benessere psicofisico dell'atleta significa ridurre il rischio di abbandono precoce causato da politiche di selezione ingiuste o episodi di overtraining ed infortuni durante le fasi critiche dello sviluppo. Questo approccio sostenibile, oltre a promuovere il successo a lungo termine, garantisce un ambiente di crescita positivo che permette a ogni atleta di esprimere il proprio potenziale, indipendentemente dalla maturità fisica o dall'età cronologica. Il risultato finale è un processo di formazione più inclusivo ed efficace, che non si limita a massimizzare le performance immediate, ma punta alla costruzione di atleti completi e resilienti nel lungo periodo.

In conclusione, questo dottorato getta le basi per una profonda riflessione sull'approccio all'allenamento e alla selezione dei giovani calciatori. Considerando l'eterogeneità nelle classi puberali e i molteplici fattori che influenzano la performance, il futuro delle metodologie sportive giovanili dovrebbe orientarsi verso modelli di sviluppo personalizzati e protocolli di valutazione della maturità che non solo valorizzino le capacità atletiche, ma promuovano anche la salute e il benessere a lungo termine degli atleti.

## 10. Bibliografia

1. Almeida-Neto, P. F., de Matos, D. G., Pinto, V. C. M., Dantas, P. M. S., Cesário, T. M., da Silva, L. F., Bulhões-Correia, A., Aidar, F. J., & Cabral, B. G. A. T. (2020). Can the neuromuscular performance of young athletes be influenced by hormone levels and different stages of puberty? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(16), 5637.
2. Angius, L., Olla, S., Pinna, M., Mura, R., Marongiu, E., Roberto, S., & Crisafulli, A. (2012). Aerobic and anaerobic capacity of adult and young professional soccer players. *Sport Sciences for Health*, 8, 95-100.
3. Arede, J., Radnor, J. M., Gonzalo-Skok, O., & Leite, N. (2024). Chronological age-based vs. bio-banded friendly football tournament: Effects on physical performance and spatial exploration behaviour in 7v7 match play. *Journal of Sports Sciences*. Advance online publication.
4. Armstrong N., Welsman J.R. Peak oxygen uptake in relation to growth and maturation in 11- to 17-year-old humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2001;85(6):546–551.
5. Armstrong, N., & Barker, A. R. (2011). Endurance training and elite young athletes. *Medicine and Sport Science*, 56, 59-83.
6. Armstrong, N., & Barker, A. R., & McManus, A. M. (2015). Muscle metabolism changes with age and maturation: How do they relate to youth sport performance? *British Journal of Sports Medicine*, 49(13), 860-864.
7. Armstrong, N., & McManus, A. M. (2011). Physiology of elite young male athletes. *Medicine and Sport Science*, 56, 1-22.
8. Athlete, Child. (2018). IOC consensus statement on training the elite child athlete. In *The adolescent athlete* (pp. 309).
9. Balyi, I., & Hamilton, A. (2004). Long-term athlete development: Trainability in childhood and adolescence. *Olympic Coach*, 16(1), 4-9.

10. Bangsbo, J. (1994). *Fitness training in football: A scientific approach*. August Krogh Institute, University of Copenhagen.
11. Bangsbo, J. (2014). Physiological demands of football. *Sports Science Exchange*, 27(125), 1-6.
12. Barker, A. R., Welsman, J. R., Fulford, J., Welford, D., & Armstrong, N. (2010). Quadriceps muscle energetics during incremental exercise in children and adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(7), 1303-1313.
13. Bar-Or, O. (1984). The growth and development of children's physiologic and perceptual responses to exercise. In J. Ilmarinen & I. Vilimiki (Eds.), *Children and sport pediatric work physiology* (pp. 3-17). Springer.
14. Baxter-Jones, A. D. G., Eisenmann, J. C., & Sherar, L. B. (2005). Controlling for maturation in pediatric exercise science. *Pediatric Exercise Science*, 17(1), 18–30.
15. Behringer, M., Vom Heede, A., Matthews, M., & Mester, J. (2011). Effects of strength training on motor performance skills in children and adolescents: A meta-analysis. *Pediatric Exercise Science*, 23(2), 186-206.
16. Behringer, M., Vom Heede, A., Yue, Z., & Mester, J. (2010). Effects of resistance training in children and adolescents: A meta-analysis. *Pediatrics*, 126(5), e1199-1210.
17. Berg, A., & Keul, J. (1988). Biochemical changes during exercise in children. In R. M. Malina (Ed.), *Young athletes* (pp. 61-78). Human Kinetics.
18. Bergeron, M. F., Mountjoy, M., Armstrong, N., Chia, M., Côté, J., Emery, C. A., Faigenbaum, A., Hall, G., Kriemler, S., Léglise, M., Malina, R., Pensgaard, A. M., Sanchez, A., Soligard, T., Sundgot-Borgen, J., van Mechelen, W., & Engebretsen, L. (2015).

19. Bergeron, M. F., Mountjoy, M., Armstrong, N., Chia, M., Côté, J., Emery, C. A., ... & Engebretsen, L. (2015). International Olympic Committee consensus statement on youth athletic development. *British journal of sports medicine*, 49(13), 843-851
20. Beunen, G., & Malina, R. M. (1988). Growth and physical performance relative to the timing of the adolescent spurt. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 16, 503-540.
21. Bezuglov, E., Malyakin, G., Emanov, A., Malyshev, G., Shoshorina, M., Savin, E., ... & Morgans, R. (2023). Are Late-Born Young Soccer Players Less Mature Than Their Early-Born Peers, Although No Differences in Physical and Technical Performance Are Evident?. *Sports*, 11(9), 179.
22. Boisseau, N., & Delamarche, P. (2000). Metabolic and hormonal responses to exercise in children and adolescents. *Sports Medicine*, 30(6), 405-422.
23. Bosco, C., Luhtanen, P., & Komi, P. V. (1983). A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 50(2), 273–282
24. Bosquet, L., Berryman, N., & Dupuy, O. (2009). A comparison of 2 optical timing systems designed to measure flight time and contact time during jumping and hopping. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(9), 2660–2665.
25. Bozděch, M., Agricola, A., & Zháněl, J. (2023). The relative age effect at different age periods in soccer: A meta-analysis. *Perceptual and Motor Skills*, 130(6), 2632-2662.
26. Brazo-Sayavera, J., Martínez-Valencia, M. A., Müller, L., Andronikos, G., & Martindale, R. J. (2018). Relative age effects in international age group championships: A study of Spanish track and field athletes. *PloS one*, 13(4), e0196386.
27. Brustio, P. R., Lupo, C., Ungureanu, A. N., Frati, R., Rainoldi, A., & Boccia, G. (2018). The relative age effect is larger in Italian soccer top-level youth categories and smaller in Serie A. *PloS one*, 13(4), e0196253.

28. Brustio, P. R., McAuley, A. B. T., Ungureanu, A. N., & Kelly, A. L. (2024). Career trajectories, transition rates, and birthdate distributions: The rocky road from youth to senior level in men's European football. *Frontiers in Sports and Active Living*, 6, 1420220.
29. Buekers, M., Borry, P., & Rowe, P. (2015). Talent in sports: Some reflections about the search for future champions. *Movement & Sport Sciences - Science & Motricité*, 88, 3-12.
30. Bukry, S. A., Justine, M., Azidin, R. M. F. R., Azhar, N. I., Zolkafi, M. A. A., Lo, C. N., & Manaf, H. (2024). Effects of the FIFA 11+ injury prevention programme on muscle strength and landing biomechanical markers of ACL injury during fatigue among youth soccer players. *Biomedical Human Kinetics*, 16(1), 173-184.
31. Bunce, J. (2018, December). The future of soccer in the United States, part 3, high performance. Paper presented at the US Soccer Conference - US Soccer Coaches Convention, Chicago, IL.
32. Calleja-González, J., Mielgo-Ayuso, J., Miguel-Ortega, Á., Marqués-Jiménez, D., Del Valle, M., Ostojic, S. M., Sampaio, J., Terrados, N., & Refoyo, I. (2021). Post-exercise recovery methods focus on young soccer players: A systematic review. *Frontiers in Physiology*, 12, 505149.
33. Carling, C., le Gall, F., Reilly, T., & Williams, A. M. (2009). Do anthropometric and fitness characteristics vary according to birth date distribution in elite youth academy soccer players? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 19(1), 3-9
34. Carskadon, M. A., & Acebo, C. (1993). A self-administered rating scale for pubertal development. *Journal of Adolescent Health*, 14(3), 190-195.

35. Castagna, C., Ganzetti, M., Ditroilo, M., Giovannelli, M., Rocchetti, A., & Manzi, V. (2013). Concurrent validity of vertical jump performance assessment systems. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(3), 761–768.
36. Castagna, C., Impellizzeri, F. M., Chamari, K., Carlomagno, D., & Rampinini, E. (2006). Aerobic fitness and yo-yo continuous and intermittent tests performances in soccer players: a correlation study. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 20(2), 320-325.
37. Castagna, C., Impellizzeri, F., Cecchini, E., Rampinini, E., & Alvarez, J. C. B. (2009). Effects of intermittent-endurance fitness on match performance in young male soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 23(7), 1954-1959.
38. Castagna, C., Manzi, V., Impellizzeri, F., Weston, M., & Alvarez, J. C. B. (2010). Relationship between endurance field tests and match performance in young soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(12), 3227-3233
39. Castillo, D., Perez-Gonzalez, B., Raya-Gonzalez, J., Fernandez-Luna, A., Burillo, P., & Lago-Rodriguez, A. (2019). Selection and promotion processes are not associated by the relative age effect in an elite Spanish soccer academy. *PLoS One*, 14(7), e0219945.
40. Chmura, P., Oliva-Lozano, J. M., Muyor, J. M., Andrzejewski, M., Chmura, J., Czarniecki, S., Kowalczyk, E., Rokita, A., & Konefał, M. (2022). Physical Performance Indicators and Team Success in the German Soccer League. *Journal of Human Kinetics*, 83, 257–265.
41. Clemente, F. M., Ramirez-Campillo, R., Castillo, D., Raya-González, J., Silva, A. F., Afonso, J., Sarmiento, H., Rosemann, T., & Knechtle, B. (2021). Effects of mental fatigue in total running distance and tactical behavior during small-sided games: A systematic review with a meta-analysis in youth and young adults' soccer players. *Frontiers in Psychology*, 12, 656445.

42. Cobley, S., Baker, J., Wattie, N., & McKenna, J. (2009). Annual age-grouping and athlete development: a meta-analytical review of relative age effects in sport. *Sports medicine*, 39, 235-256.
43. Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. L. Erlbaum Associates.
44. Costello, E. J., Mustillo, S., Erkanli, A., Keeler, G., & Angold, A. (2003). Prevalence and development of psychiatric disorders in childhood and adolescence. *Archives of general psychiatry*, 60(8), 837-844.
45. Cronin, J. B., & Templeton, R. L. (2008). Timing light height affects sprint times. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(1), 318–320.
46. Cumming, S. P., Lloyd, R. S., Oliver, J. L., Eisenmann, J. C., & Malina, R. M. (2017). Bio-banding in sport: Applications to competition, talent identification, and strength and conditioning of youth athletes. *Strength and Conditioning Journal*, 39(2), 34-47.
47. Cunha, G. D. S., Vaz, M. A., Herzog, W., Geremia, J. M., Leites, G. T., & Reischak-Oliveira, Á. (2019). Maturity status effects on torque and muscle architecture of young soccer players. *Journal of Sports Sciences*. 38.11-12 (2020): 1286-1295
48. Cunha, G., Lorenzi, T., Sapata, K., Lopes, A. L., Gaya, A. C., & Oliveira, Á. (2011). Effect of biological maturation on maximal oxygen uptake and ventilatory thresholds in soccer players: An allometric approach. *Journal of Sports Sciences*, 29(10), 1029-1039.
49. Cushion, C., Ford, P. R., & Williams, A. M. (2012). Coach behaviours and practice structures in youth soccer: Implications for talent development. *Journal of Sports Sciences*, 30(15), 1631-1641.
50. da Costa, J. C., Borges, P. H., Ramos-Silva, L. F., Weber, V. M. R., Moreira, A., & Ronque, E. R. V. (2023). Body size, maturation and motor performance in young soccer

players: relationship to technical actions in small-sided games. *Biology of Sport*, 40(1), 51-61.

51. Danis, A., Kyriazis, Y., & Klissouras, V. (2003). The effect of training in male prepubertal and pubertal monozygotic twins. *European Journal of Applied Physiology*, 89(3-4), 309-318.
52. Delaney, J. A., Cummins, C. J., Thornton, H. R., & Duthie, G. M. (2018). Importance, reliability, and usefulness of acceleration measures in team sports. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(12), 3485–3493.
53. Deprez, D., Coutts, A. J., Franssen, J., Deconinck, F., Lenoir, M., Vaeyens, R., & Philippaerts, R. (2013). Relative age, biological maturation and anaerobic characteristics in elite youth soccer players. *International Journal of Sports Medicine*, 34(10), 897-903.
54. Deprez, D., Vaeyens, R., Coutts, A. J., Lenoir, M., & Philippaerts, R. (2012). Relative age effect and Yo-Yo IR1 in youth soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 33(12), 987–993.
55. Di Luigi, L., Baldari, C., Gallotta, M. C., Perroni, F., Romanelli, F., Lenzi, A., & Guidetti, L. (2006). Salivary steroids at rest and after a training load in young male athletes: Relationship with chronological age and pubertal development. *International Journal of Sports Medicine*, 27(9), 709-717.
56. Doyle, J. R., & Bottomley, P. A. (2019). The relative age effect in European elite soccer: A practical guide to Poisson regression modelling. *PLOS One*, 14(4), e0213988.
57. Eriksson, B. O., Gollnick, P. D., & Saltin, B. (1974). The effect of physical training on muscle enzyme activities and fiber composition in 11-year-old boys. *Acta Paediatrica Belgica*, 28, 245-252.

58. Evans, D. A., Jackson, D. T., Kelly, A. L., Williams, C. A., McAuley, A. B. T., Knapman, H., & Morgan, P. T. (2022). Monitoring postmatch fatigue during a competitive season in elite youth soccer players. *Journal of Athletic Training*, 57(2), 184-190.
59. Faigenbaum, A. D., Kraemer, W. J., Blimkie, C. J., Jeffreys, I., Micheli, L. J., Nitka, M., & Rowland, T. W. (2009). Youth resistance training: Updated position statement paper from the National Strength and Conditioning Association. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(5 Suppl), S60-S79.
60. Fanchini, M., Castagna, C., Coutts, A. J., Schena, F., McCall, A., & Impellizzeri, F. M. (2014). Are the Yo-Yo intermittent recovery test levels 1 and 2 both useful? Reliability, responsiveness and interchangeability in young soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 32(20), 1950–1957
61. Fernández-Jávega, G., Moya-Ramón, M., & Peña-González, I. (2024). Contextual factors in understanding the jumping performance of young football goalkeepers. *Apunts Sports Medicine*, 59(221), 100436.
62. Ferrillo, M., Curci, C., Rocuzzo, A., Migliario, M., Invernizzi, M., & Sire, A. (2021). Reliability of cervical vertebral maturation compared to hand-wrist for skeletal maturation assessment in growing subjects: A systematic review. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation* 34.6 (2021): 925-936
63. Figueiredo, A. J., Coelho-e-Silva, M. J., Cumming, S. P., & Malina, R. M. (2019). Relative age effect: Characteristics of youth soccer players by birth quarter and subsequent playing status. *Journal of sports sciences*, 37(6), 677-684.
64. Figueiredo, A. J., Gonçalves, C. E., Coelho e Silva, M. J., & Malina, R. M. (2009). Characteristics of youth soccer players who drop out, persist or move up. *Journal of sports sciences*, 27(9), 883-891.

65. Figueiredo, A. J., Goncalves, C. E., Coelho, E. S. M. J., & Malina, R. M. (2009). Youth soccer players, 11-14 years: Maturity, size, function, skill and goal orientation. *Annals of Human Biology*, 36(1), 60–73.
66. Figueiredo, P., Seabra, A., Brito, M., Galvão, M., & Brito, J. (2021). Are soccer and futsal affected by the relative age effect? The Portuguese Football Association case. *Frontiers in psychology*, 12, 679476.
67. Fitzpatrick, J. F., Hicks, K. M., Russell, M., & Hayes, P. R. (2021). The reliability of potential fatigue-monitoring measures in elite youth soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(12), 3448-3452.
68. Fitzsimons, M., Dawson, B., Ward, D., & Wilkinson, A. (1993). Cycling and running tests of repeated sprint ability. *Australian Journal of Science and Medicine in Sport*, 25, 82–87.
69. Fragoso, I., et al. (2014). Validity of adult stature prediction and performance of adult stature estimation using Khamis and Roche method in a sample of Portuguese children and adolescents of both sexes [C]. Paper presented at the 19th Annual Congress of the European College of Sport Science.
70. Francini, L., Rampinini, E., Bosio, A., Connolly, D., Carlomagno, D., & Castagna, C. (2019). Association between match activity, endurance levels and maturity in youth football players. *International Journal of Sports Medicine*, 40(9), 576-584.
71. Fraser-Thomas, J., Côté, J., & Deakin, J. (2008). Understanding dropout and prolonged engagement in adolescent competitive sport. *Psychology of Sport and Exercise*, 9(5), 645-662.
72. Gagné, François. *Differentiating giftedness from talent: The DMGT perspective on talent development*. Routledge, 2020.

73. Gil, S. M., Gil, J., Ruiz, F., Irazusta, A., & Irazusta, J. (2007). Physiological and anthropometric characteristics of young soccer players according to their playing position: relevance for the selection process. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 21(2), 438-445.
74. Gilliam, T. B., & Freedson, P. (1980). Effects of a 12-week school physical fitness program on peak VO<sub>2</sub>, body composition and blood lipids in 7 to 9 year old children. *International Journal of Sports Medicine*, 1, 73-78.
75. Goto, H., Morris, J. G., & Nevill, M. E. (2019). Influence of biological maturity on the match performance of 8- to 16-year-old, elite, male, youth soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(11), 3078-3084.
76. Gotze, M., & Hoppe, M. W. (2020). Relative age effect in elite German soccer: Influence of gender and competition level. *Frontiers in Psychology*, 11, 587023.
77. Greenlees, I., Parr, A., Murray, S., & Burkitt, E. (2021). Elite youth soccer players' sources and types of soccer confidence. *Sports*, 9(11), 146.
78. Grendstad, H., Nilsen, A. K., Rygh, C. B., Hafstad, A., Kristoffersen, M., Iversen, V. V., Nybakken, T., Vestbostad, M., Algroy, E. A., Sandbakk, O., & Gundersen, H. (2020). Physical capacity, not skeletal maturity, distinguishes competitive levels in male Norwegian U14 soccer players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 30(2), 254–263
79. Haralambie, G. (1982). Enzyme activities in skeletal muscle of 13–15 year old adolescents. *Bulletin Européen de Physiopathologie Respiratoire*, 18, 65-74.
80. Harley, J. A., Barnes, C. A., Portas, M., Lovell, R., Barrett, S., Paul, D., & Weston, M. (2010). Motion analysis of match-play in elite U12 to U16 age-group soccer players. *Journal of sports sciences*, 28(13), 1391-1397.

81. Heilmann, F., Kuhlig, A., & Stoll, O. (2024). Relative age effects in German youth A and B men's soccer teams: Survival of the fittest? *Frontiers in Sports and Active Living*, 6, 1432605.
82. Helsen, W. F., Hodges, N. J., Van Winckel, J., & Starkes, J. L. (2000). The roles of talent, physical precocity and
83. Helsen, W. F., van Winckel, J., & Williams, A. M. (2005). The relative age effect in youth soccer across Europe. *Journal of Sports Sciences*, 23(6), 629-636.
84. Hermassi, S., Konukman, F., Al-Marri, S. S., Hayes, L. D., Bartels, T., & Schwesig, R. (2024). Associations between biological maturation, physical performance, postural control, and mathematical achievement in youth soccer players. *Plos one*, 19(3), e0298301.
85. Hill, M., Scott, S., Malina, R. M., McGee, D., & Cumming, S. P. (2020). Relative age and maturation selection biases in academy football. *Journal of Sports Sciences*, 38(11-12), 1359–1367.
86. Hirose, N. (2009). Relationships among birth-month distribution, skeletal age and anthropometric characteristics in adolescent elite soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 27(11), 1159–1166
87. International Olympic Committee consensus statement on youth athletic development. *British Journal of Sports Medicine*, 49(13), 843-851.
88. Italian Football Federation. (2023). ReportCalcio 2023.
89. Iuliano-Burns, S., Mirwald, R. L., & Bailey, D. A. (2001). Timing and magnitude of peak height velocity and peak tissue velocities for early, average, and late maturing boys and girls. *American Journal of Human Biology*, 13(1), 1-8.

90. Iuliano-Burns, S., Mirwald, R. L., & Bailey, D. A. (2001). Timing and magnitude of peak height velocity and peak tissue velocities for early, average, and late maturing boys and girls. *American Journal of Human Biology*, 13(1), 1-8.
91. Jackowski, S. A., Erlandson, M. C., Mirwald, R. L., Faulkner, R. A., Bailey, D. A., Kontulainen, S. A., Cooper, D. M., & Baxter-Jones, A. D. (2011). Effect of maturational timing on bone mineral content accrual from childhood to adulthood: Evidence from 15 years of longitudinal data. *Bone*, 48(5), 1178–1185.
92. Jakobsson, J., Julin, A. L., Persson, G., & Malm, C. (2021). Darwinian Selection Discriminates Young Athletes: the Relative Age Effect in Relation to Sporting Performance. *Sports Medicine Open*, 7(1), 16.
93. Jones, C. M., McNarry, M. A., & Owen, N. J. (2020). The effect of body size on countermovement jump kinetics in children aged 7-11 years. *European Journal of Sport Science*, 20(2), 174-181.
94. Joyner, P. W., Lewis, J. S., Dawood, R. S., Mallon, W. J., Kirkendall, D. T., & Garrett Jr, W. E. (2020). Relative age effect: beyond the youth phenomenon. *American Journal of Lifestyle Medicine*, 14(4), 429-436.
95. Kapoor, P., Balachandran, R., Chowdhry, A., & Perinetti, G. (2023). Biomarkers in body fluids as indicators of skeletal maturity: A systematic review and meta-analysis. *Rambam Maimonides Medical Journal*, 14(4), e0021.
96. Kelly, A. L., & Williams, C. A. (2020). Physical Characteristics and the Talent Identification and Development Processes in Male Youth Soccer: A Narrative Review. *Strength & Conditioning Journal*, 42(6), 15–34.
97. Kelly, A., Wilson, M. R., Jackson, D. T., Goldman, D. E., Turnnidge, J., Cote, J., & Williams, C. A. (2021). A multidisciplinary investigation into "playing-up" in academy football according to age phase. *Journal of Sports Sciences*, 39(8), 854–864.

98. Khamis, H. J., & Roche, A. F. (1994). Predicting adult stature without using skeletal age: The Khamis-Roche method. *Pediatrics*, 94(4), 504-507.
99. Koopman-Verhoeff, M. E., Gredvig-Ardito, C., Barker, D. H., Saletin, J. M., & Carskadon, M. A. (2020). Classifying pubertal development using child and parent report: Comparing the pubertal development scales to Tanner staging. *Journal of Adolescent Health*, 66(5), 597-602.
100. Krustup, P., Mohr, M., Amstrup, T., Rysgaard, T., Johansen, J., Steensberg, A., Pedersen, P. K., & Bangsbo, J. (2003). The Yo-Yo intermittent recovery test: Physiological response, reliability, and validity. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35(4), 697–705.
101. Lesinski, M., Prieske, O., & Granacher, U. (2016). Effects and dose-response relationships of resistance training on physical performance in youth athletes: A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 50(13), 781-795.
102. Leyhr, D., Murr, D., Basten, L., Eichler, K., Hauser, T., Ludin, D., Romann, M., Sardo, G., & Honer, O. (2020). Biological Maturity Status in Elite Youth Soccer Players: A Comparison of Pragmatic Diagnostics With Magnetic Resonance Imaging. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2, 587861
103. Lloyd, R. S., & Oliver, J. L. (2012). The youth physical development model: A new approach to long-term athletic development. *Strength & Conditioning Journal*, 34(3), 61-72.
104. Lloyd, R. S., Oliver, J. L., Faigenbaum, A. D., Myer, G. D., & De Ste Croix, M. B. (2014). Chronological age vs. biological maturation: Implications for exercise programming in youth. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(5), 1454–1464.

105. Lovell, R., Towlson, C., Parkin, G., Portas, M., Vaeyens, R., & Cobley, S. (2015). Soccer player characteristics in English lower-league development programmes: The relationships between relative age, maturation, anthropometry and physical fitness. *PloS one*, 10(9), e0137238.
106. Lucchese, A., Bondemark, L., Farronato, M., Rubini, G., Gherlone, E., Giudice, A., & Manuelli, M. (2022). Efficacy of the cervical vertebral maturation method: A systematic review. *Turkish Journal of Orthodontics*, 35(1), 55-66.
107. Lupo, C., Boccia, G., Ungureanu, A. N., Frati, R., Marocco, R., & Brustio, P. R. (2019). The beginning of senior career in team sport is affected by relative age effect. *Frontiers in Psychology*, 10, 1465.
108. Malina, R. M., Bouchard, C., & Bar-Or, O. (2004). Growth, maturation, and physical activity. *Human Kinetics*.
109. Malina, R. M., Coelho, E. S. M. J., Figueiredo, A. J., Carling, C., & Beunen, G. P. (2012). Interrelationships among invasive and non-invasive indicators of biological maturation in adolescent male soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 30(15), 1705–1717.
110. Malina, R. M., Cumming, S. P., Rogol, A. D., Coelho e Silva, M. J., Figueiredo, A. J., Konarski, J., & Kozieł, S. (2019). Bio-banding in youth sports: Background, concept and application. *Sports Medicine*, 49(11), 1671-1685.
111. Malina, R. M., Eisenmann, J. C., Cumming, S. P., Ribeiro, B., & Aroso, J. (2004). Maturity-associated variation in the growth and functional capacities of youth football (soccer) players 13–15 years. *European journal of applied physiology*, 91, 555-562
112. Malina, R. M., Kozieł, S. M., Králik, M., Chrzanowska, M., & Suder, A. (2021). Prediction of maturity offset and age at peak height velocity in a longitudinal series of boys and girls. *American Journal of Human Biology*, 33(6), e23551.

113. Malina, R. M., Rogol, A. D., Cumming, S. P., Coelho e Silva, M. J., & Figueiredo, A. J. (2015). Biological maturation of youth athletes: Assessment and implications. *British Journal of Sports Medicine*, 49(13), 852-859.
114. Markovic, G., Dizdar, D., Jukic, I., & Cardinale, M. (2004). Reliability and factorial validity of squat and countermovement jump tests. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 18(3), 551-555.
115. Markovic, S., Mirkov, D. M., Nedeljkovic, A., & Jaric, S. (2014). Body size and countermovement depth confound relationship between muscle power output and jumping performance. *Human movement science*, 33, 203-210.
116. Matos, N., & Winsley, R. J. (2007). Trainability of young athletes and overtraining. *Journal of Sports Science and Medicine*, 6(3), 353-367.
117. McBurnie, A. J., Dos'Santos, T., Johnson, D., & Leng, E. (2021). Training management of the elite adolescent soccer player throughout maturation. *Sports*, 9(12), 1-11.
118. McQuilliam, S. J., Clark, D. R., Erskine, R. M., & Brownlee, T. E. (2020). Free-weight resistance training in youth athletes: A narrative review. *Sports Medicine*, 50(9), 1567-1580.
119. Mersmann, F., Bohm, S., Schroll, A., Boeth, H., Duda, G. N., & Arampatzis, A. (2017). Muscle and tendon adaptation in adolescent athletes: A longitudinal study. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 27(1), 75-82.
120. Meylan, C. M., Cronin, J. B., Oliver, J. L., Hopkins, W. G., & Contreras, B. (2014). The effect of maturation on adaptations to strength training and detraining in 11-15-year-olds. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 24(3), e156-e164.

121. Meylan, C., Cronin, J., Oliver, J., & Hughes, M. (2010). Talent identification in soccer: The role of maturity status on physical, physiological and technical characteristics. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 5(4), 571-592.
122. Mikulič, M., Gregora, P., Benkovský, L., & Peráček, P. (2015). The relative age effect on the selection in the Slovakia National Football Teams. *Acta Facultatis Educationis Physicae Universitatis Comenianae*, 55(2), 122-131.
123. Mills, K., Baker, D., Pacey, V., Wollin, M., & Drew, M. K. (2017). What is the most accurate and reliable methodological approach for predicting peak height velocity in adolescents? A systematic review. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 20(6), 572-577.
124. Mirwald, R. L., Baxter-Jones, A. D., Bailey, D. A., & Beunen, G. P. (2002). An assessment of maturity from anthropometric measurements. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(4), 689-694.
125. Monasterio, X., Gil, S. M., Bidaurrazaga-Letona, I., Cumming, S. P., Malina, R. M., Williams, S., Lekue, J. A., Santisteban, J. M., Diaz-Beitia, G., & Larruskain, J. (2024). Estimating maturity status in elite youth soccer players: Evaluation of methods. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 56(6), 1124-1133.
126. Montoye, H. J. (1982). Age and oxygen utilization during submaximal treadmill exercise in males. *Journal of Gerontology*, 37(4), 396-402.
127. Moore, S. A., Cumming, S. P., Balletta, G., Ramage, K., Eisenmann, J. C., Baxter-Jones, A. D. G., Jackowski, S. A., & Sherar, L. B. (2020). Exploring the relationship between adolescent biological maturation, physical activity, and sedentary behaviour: A systematic review and narrative synthesis. *Annals of Human Biology*, 47(4), 365-383.
128. Mountjoy, M., Rhind, D. J., Tiivas, A., & Leglise, M. (2015). Safeguarding the child athlete in sport: A review, a framework and recommendations for the IOC youth athlete development model. *British Journal of Sports Medicine*, 49(13), 883-886.

129. Mujika, I., Vaeyens\*, R., Matthys, S. P., Santisteban, J., Goirienea, J., & Philippaerts, R. (2009). The relative age effect in a professional football club setting. *Journal of sports sciences*, 27(11), 1153-1158.
130. Müller, L., Hildebrandt, C., Schnitzer, M., & Raschner, C. (2016). The role of a relative age effect in the 12th Winter European Youth Olympic Festival in 2015. *Perceptual and motor skills*, 122(2), 701-718
131. Murtagh, C. F., Brownlee, T. E., O'Boyle, A., Morgans, R., Drust, B., & Erskine, R. M. (2018). Importance of speed and power in elite youth soccer depends on maturation status. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(2), 297-303.
132. Musch, J., & Grondin, S. (2001). Unequal competition as an impediment to personal development: A review of the relative age effect in sport. *Developmental Review*, 21(2), 147-167.
133. Negra, Y., Sammoud, S., Nevill, A. M., & Chaabene, H. (2022). Change of direction speed in youth male soccer players: the predictive value of anthropometrics and biological maturity. *Pediatric Exercise Science*, 35(1), 1-7
134. Negriff, S., & Susman, E. J. (2011). Pubertal timing, depression, and externalizing problems: A framework, review, and examination of gender differences. *Journal of Research on Adolescence*, 21(3), 717-746.
135. Nikolaïdis, P. (2011). Anaerobic power across adolescence in soccer players. *Human Movement*, 12(4), 342-347.
136. Obert, P., Mandigout, S., Nottin, S., Vinet, A., N'Guyen, D., & Lecoq, A. M. (2003). Cardiovascular responses to endurance training in children: Effect of gender. *European Journal of Clinical Investigation*, 33, 199-208.

137. Ostojic, S. M., Castagna, C., Calleja-González, J., Jukic, I., Idrizovic, K., & Stojanovic, M. (2014). The biological age of 14-year-old boys and success in adult soccer: Do early maturers predominate in the top-level game? *Research in Sports Medicine*, 22(4), 398-407.
138. Paterson, D. H., Cunningham, D. A., & Bumstead, L. A. (1986). Recovery O<sub>2</sub> and blood lactic acid: Longitudinal analysis in boys aged 11 to 15 years. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 55(1), 93-99.
139. Peña-González, I., Javaloyes, A., Sarabia, J. M., & Moya-Ramón, M. (2021). Relative age-related differences between different competitive levels and field positions in young soccer players. *Research in sports medicine*, 29(3), 254-264.
140. Pérez-González, B., León-Quismondo, J., Bonal, J., Burillo, P., & Fernández-Luna, Á. (2021). The new generation of professional soccer talent is born under the bias of the RAE: Relative age effect in international male youth soccer championships. *Children*, 8(12), 1117.
141. Perroni, F., Amatori, S., Corsi, L., Bensi, R., Guidetti, L., Baldari, C., ... & Buzzachera, C. F. (2024). Assessment of Performance in Youth Soccer Players: Should We Consider the Maturation Status?. *Journal of Human Kinetics*, 93.
142. Perroni, F., Castagna, C., Amatori, S., Gobbi, E., Vetrano, M., Visco, V., ... & Sisti, D. (2023). Use of exploratory factor analysis to assess the fitness performance of youth football players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 37(7), e430-e437
143. Perroni, F., Fittipaldi, S., Falcioni, L., Ghizzoni, L., Borrione, P., Vetrano, M., Del Vescovo, R., Migliaccio, S., Guidetti, L., & Baldari, C. (2019). Effect of pre-season training phase on anthropometric, hormonal and fitness parameters in young soccer players. *PLoS One*, 14(11), e0225471.

144. Perroni, F., Migliaccio, S., Borrione, P., Vetrano, M., Amatori, S., Sisti, D., ... & Visco, V. (2020). Can haematological and hormonal biomarkers predict fitness parameters in youth soccer players? A pilot study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(17), 6294.
145. Perroni, F., Pintus, A., Frandino, M., Guidetti, L., & Baldari, C. (2018). Relationship among repeated sprint ability, chronological age, and puberty in young soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(2), 364–371.
146. Perroni, F., Vetrano, M., Camolese, G., Guidetti, L., & Baldari, C. (2015). Anthropometric and somatotype characteristics of young soccer players: Differences among categories, subcategories, and playing position. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(8), 2097-2104.
147. Perroni, F., Vetrano, M., Guidetti, L., & Baldari, C. (2017). Is self-administered rating scale for pubertal development a predictor of countermovement jump in young soccer players? *The Open Sports Sciences Journal*, 10, 122-131.
148. Perroni, F., Vetrano, M., Rainoldi, A., Guidetti, L., & Baldari, C. (2014). Relationship among explosive power, body fat, fat free mass and pubertal development in youth soccer players: A preliminary study. *Sport Sciences for Health*, 10(2), 67–73.
149. Petersen, A. C., Crockett, L., Richards, M., & Boxer, A. (1988). A self-report measure of pubertal status: Reliability, validity, and initial norms. *Journal of Youth and Adolescence*, 17(2), 117–133.
150. Philippaerts, R. M., Vaeyens, R., Janssens, M., Van Renterghem, B., Matthys, D., Craen, R., Bourgois, J., Vrijens, J., Beunen, G., & Malina, R. M. (2006). The relationship between peak height velocity and physical performance in youth soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 24(3), 221-230.

151. F. Helsen, W., Hodges, N. J., Winckel, J. V., & Starkes, J. L. (2000). The roles of talent, physical precocity and practice in the development of soccer expertise. *Journal of sports sciences*, 18(9), 727-736.
152. Rađa, A., Padulo, J., Jelaska, I., Ardigò, L. P., & Fumarco, L. (2018). Relative age effect and second-tiers: No second chance for later-born players. *PloS one*, 13(8), e0201795.
153. Radnor, J. M., Staines, J., Bevan, J., Cumming, S. P., Kelly, A. L., Lloyd, R. S., & Oliver, J. L. (2021). Maturity Has a Greater Association than Relative Age with Physical Performance in English Male Academy Soccer Players. *Sports (Basel)*, 9(12), 171
154. Rampinini, E., Impellizzeri, F. M., Castagna, C., Azzalin, A., Ferrari Bravo, D., & Wisløff, U. (2008). Effect of match-related fatigue on short-passing ability in young soccer players. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(5), 934-942.
155. Ratel, S., Williams, C. A., Oliver, J., & Armstrong, N. (2006). Effects of age and recovery duration on performance during multiple treadmill sprints. *International Journal of Sports Medicine*, 27(1), 1-8.
156. Read, P. J., Oliver, J. L., De Ste Croix, M. B. A., Myer, G. D., & Lloyd, R. S. (2018). Landing kinematics in elite male youth soccer players of different chronologic ages and stages of maturation. *Journal of Athletic Training*, 53(4), 372-378.
157. Reilly, T., Bangsbo, J., & Franks, A. (2000). Anthropometric and physiological predispositions for elite soccer. *Journal of Sports Sciences*, 18(9), 669–683
158. Ribeiro, N., Martinho, D. V., Pereira, J. R., Rebelo, A., Monasterio, X., Gonzalo-Skok, O., Valente-Dos-Santos, J., & Tavares, F. (2024). Injury risk in elite young male soccer players: A review on the impact of growth, maturation, and workload. *Journal of Strength and Conditioning Research*.1834-1848.

159. Riddell, M. C. (2008). The endocrine response and substrate utilization during exercise in children and adolescents. *Journal of Applied Physiology*, 105(2), 725-733.
160. Roemmich, J. N., & Rogol, A. D. (1995). Physiology of growth and development: Its relationship to performance in the young athlete. *Clinics in Sports Medicine*, 14(3), 483-502.
161. Romann, M., Lüdin, D., & Born, D. P. (2020). Bio-banding in junior soccer players: A pilot study. *BMC Research Notes*, 13(1), 240.
162. Rieger, E., Hutmacher, N., Eichelberger, P., Löcherbach, C., Albrecht, S., & Romann, M. (2022). Ultrasound imaging-based methods for assessing biological maturity during adolescence and possible application in youth sport: A scoping review. *Children*, 9(12), 1985.
163. Sánchez Pastor, A., García-Sánchez, C., Marquina Nieto, M., & de la Rubia, A. (2023). Influence of strength training variables on neuromuscular and morphological adaptations in prepubertal children: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(6), 4833.
164. Seitz, L. B., Reyes, A., Tran, T. T., de Villarreal, E. S., & Haff, G. G. (2014). Increases in lower-body strength transfer positively to sprint performance: A systematic review with meta-analysis. *Sports Medicine*, 44(12), 1693-1702.
165. Selmi, M. A., Sassi, R. H., Yahmed, M. H., Giannini, S., Perroni, F., & Elloumi, M. (2020). Normative data and physical determinants of multiple sprint sets in young soccer players aged 11–18 years: Effect of maturity status. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(2), 506–515.
166. Serinelli, S., Panetta, V., Pasqualetti, P., & Marchetti, D. (2011). Accuracy of three age determination X-ray methods on the left hand-wrist: A systematic review and meta-analysis. *Legal Medicine*, 13(3), 120-133.

167. Silva, J. R. (2022). The soccer season: Performance variations and evolutionary trends. *PeerJ*, 10, e14082.
168. Simonton, D. K. (1999). Talent and its development: An emergenic and epigenetic model. *Psychological Review*, 106(3), 435-457.
169. Slinde, F., Suber, C., Suber, L., Edwén, C. E., & Svantesson, U. (2008). Test-retest reliability of three different countermovement jumping tests. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 22(2), 640-644.
170. Smith, K. L., Weir, P. L., Till, K., Romann, M., & Cobley, S. (2018). Relative Age Effects Across and Within Female Sport Contexts: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 48(6), 1451–1478.
171. Sporiš, G., Vučetić, V., Jovanović, M., Milanović, Z., Ručević, M., & Vuleta, D. (2011). Are there any differences in power performance and morphological characteristics of Croatian adolescent soccer players according to the team position?. *Collegium antropologicum*, 35(4), 1089-1094
172. Stiles, V. H., James, I. T., Dixon, S. J., & Guisasola, I. N. (2009). Natural turf surfaces: The case for continued research. *Sports Medicine*, 39(1), 65–84.
173. Stølen, T., Chamari, K., Castagna, C., & Wisløff, U. (2005). Physiology of soccer: an update. *Sports medicine*, 35, 501-536.
174. Sullivan, J., Roberts, S. J., Mckeown, J., Littlewood, M., McLaren-Towlson, C., Andrew, M., & Enright, K. (2023). Methods to predict the timing and status of biological maturation in male adolescent soccer players: A narrative systematic review. *PLoS One*, 18(9), e0286768.
175. Sunnegårdh, J., Bratteby, L. E., Nordesjö, L. O., & Nordgren, B. (1988). Isometric and isokinetic muscle strength, anthropometry and physical activity in 8 and

13 year old Swedish children. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 58, 291-297

176. Tanner J.M. Harvard University Press; 1990. *Foetus into Man: Physical Growth from Conception to Maturity*.
177. Teoldo, I., Dambroz, F., & González-Víllora, S. (2024). Exploring the effects of physical fatigue on cognitive performance of youth soccer players. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 22(1), 290-305.
178. Timmons, B. W., Bar-Or, O., & Riddell, M. C. (2003). Oxidation rate of exogenous carbohydrate during exercise is higher in boys than in men. *Journal of Applied Physiology*, 94(1), 278-284.
179. Toselli, S., Mauro, M., Grigoletto, A., Cataldi, S., Benedetti, L., Nanni, G., Di Miceli, R., Aiello, P., Gallamini, D., Fischetti, F., & Greco, G. (2022). Assessment of body composition and physical performance of young soccer players: Differences according to the competitive level. *Biology*, 11(6), 823.
180. Toselli, S., Mauro, M., Grigoletto, A., Cataldi, S., Benedetti, L., Nanni, G., ... & Greco, G. (2022). Maturation selection biases and relative age effect in Italian Soccer Players of different levels. *Biology*, 11(11), 1559.
181. Towlson, C., MacMaster, C., Parr, J., & Cumming, S. (2022). One of these things is not like the other: time to differentiate between relative age and biological maturity selection biases in soccer? *Science and Medicine in Football*, 6(3), 273-276.
182. Towlson, C., Salter, J., Ade, J. D., Enright, K., Harper, L. D., Page, R. M., & Malone, J. J. (2021). Maturity-associated considerations for training load, injury risk, and physical performance in youth soccer: One size does not fit all. *Journal of Sport and Health Science*, 10(4), 403-412.

183. Towlson, C., Watson, D. J., Cumming, S., Salter, J., & Toner, J. (2023). Soccer academy practitioners' perceptions and application of bio-banding. *PLoS One*, 18(1), e0274079.
184. Vaeyens, R., (2006). A multidisciplinary selection model for youth soccer: The Ghent Youth Soccer Project. *British Journal of Sports Medicine*, 40(11), 928-934.
185. Vaeyens, R., Lenoir, M., Williams, A. M., & Philippaerts, R. M. (2008). Talent identification and development programmes in sport: current models and future directions. *Sports medicine*, 38, 703-714.
186. Vaeyens, R., Malina, R. M., Janssens, M., Van Renterghem, B., Bourgois, J., Vrijens, J., & Philippaerts, R. M. (2006). A multidisciplinary selection model for youth soccer: The Ghent Youth Soccer Project. *British Journal of Sports Medicine*, 40(11), 928-934.
187. Viru, A., Loko, J., Harro, M., Volver, A., Laaneots, L., & Viru, M. (1999). Critical periods in the development of performance capacity during childhood and adolescence. *European Journal of Physical Education*, 4(1), 75-119.
188. Williams, A. M. (2023). *Science and football: Identifying and developing talent*.
189. Williams, A. M., Ford, P. R., & Drust, B. (2023). Talent identification and development in soccer since the millennium. In A. M. Williams (Ed.), *Science and football*.
190. Wing, C. E., Turner, A. N., & Bishop, C. J. (2020). Importance of strength and power on key performance indicators in elite youth soccer. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(7), 2006-2014.
191. Wisloff, U, Castagna, C., Helgerud, J., Jones, R., Hoff, J. (2004). Strong correlation of maximal squat strength with sprint performance and vertical jump height in elite soccer players. *British Journal of Sports Medicine*, 38(3), 285-288.

192. Wragg, C. B., Maxwell, N. S., & Doust, J. H. (2000). Evaluation of the reliability and validity of a soccer-specific field test of repeated sprint ability. *European Journal of Applied Physiology*, 83(1), 77–83
193. Yagüe, J. M., de la Rubia, A., Sánchez-Molina, J., Maroto-Izquierdo, S., & Molinero, O. (2018). The relative age effect in the 10 best leagues of male professional football of the Union of European Football Associations (UEFA). *Journal of Sports Science and Medicine*, 17(3), 409-416.
194. Zanetti, V., Aoki, M. S., Bradley, P., Carling, C., Marino, T. K., & Moreira, A. (2021). Running Performance and Hormonal, Maturity and Physical Variables in Starting and Non-Starting Elite U14 Soccer Players During a Congested Match Schedule. *Journal of Human Kinetics*, 80, 287–295.