

Métodos de estimación de la maduración biológica en deportistas en etapa de desarrollo y crecimiento: Revisión bibliográfica

Methods for estimating biological maturation in developing and growing athletes: A literature review

Mario Albaladejo-Saura¹, Raquel Vaquero-Cristóbal^{1,2}, Francisco Esparza-Ros¹

¹ Cátedra Internacional de Cineantropometría, Universidad Católica San Antonio, Murcia, España

² Facultad de Ciencias del Deporte, Universidad Católica San Antonio, Murcia, España

Autor para la correspondencia: Raquel Vaquero-Cristóbal, rvaquero@ucam.edu

Título abreviado:

Estimación de la maduración en deportistas en crecimiento: Revisión bibliográfica

Cómo citar el artículo:

Albaladejo-Saura, M., Vaquero-Cristóbal, R., & Esparza-Ros, F. (2022). Métodos de estimación de la maduración biológica en Ciencias del Deporte: Revisión bibliográfica. *Cultura, Ciencia y Deporte*, 17(53), 55-75. <https://doi.org/10.12800/ccd.v17i53.1925>

Recibido: 28 marzo 2022 / Aceptado: 30 mayo 2022

Resumen

Los indicadores relacionados con la maduración biológica han sido estudiados desde hace décadas. Los cambios que produce la maduración afectan de forma trascendental al rendimiento de los jóvenes deportistas. El objetivo de esta revisión bibliográfica fue analizar los métodos de estimación de la maduración biológica más empleados en ciencias del deporte. Se han identificado cuatro métodos principales que abordan indicadores de la maduración biológica distintos: los métodos radiográficos, que estiman la edad biológica a través del desarrollo óseo; métodos antropométricos, que estiman el ritmo de la maduración biológica a través de cambios en la velocidad de crecimiento y la proporcionalidad; métodos de maduración sexual, basados en la manifestación de los caracteres sexuales masculinos y femeninos; y métodos de maduración dental, que estiman la edad biológica a través del desarrollo dental. El "gold standard" para estimar el estado madurativo son los métodos basados en radiografía de la mano y muñeca, sin embargo, sus limitaciones hacen que su empleo en la valoración de deportistas jóvenes se encuentre condicionado. Una alternativa muy utilizada son las antropométricas, que aunque no están exentas de limitaciones, han mostrado tener suficiente fiabilidad y validez. La maduración sexual o dental parecen no ser tan aplicables en este ámbito.

Palabras clave: pubertad, crecimiento, ejercicio físico, desarrollo madurativo, rendimiento.

Abstract

The indicators related to biological maturation have been studied for decades. The changes produced by maturation have a transcendental effect on the performance of young athletes. The aim of this literature review was to analyze the most commonly used methods of estimating biological maturation in sports science. Four main methods have been identified that address different indicators of biological maturation: radiographic methods, which estimate biological age through bone development; anthropometric methods, which estimate the rate of biological maturation through changes in growth velocity and proportionality; sexual maturation methods, based on the manifestation of male and female sexual characteristics; and dental maturation methods, which estimate biological age through dental development. The "gold standard" for estimating the maturational state are the methods based on radiography of the hand and wrist; however, their limitations mean that their use in the assessment of young athletes is conditioned. A widely used alternative are anthropometric methods, which, although not free of limitations, have been shown to have sufficient reliability and validity. Sexual or dental maturation do not seem to be as applicable in this field.

Keywords: puberty, growth, physical exercise, maturational development, performance.

Introducción

Aproximación conceptual al término de maduración, edad cronológica, edad biológica y pico máximo de crecimiento

La maduración, en relación al crecimiento humano, se refiere al tiempo y al proceso de cambio desde la niñez hasta alcanzar el estado madurativo adulto (Malina & Bouchard, 1991). Estos procesos han sido ampliamente estudiados en sus diferentes etapas, pero tradicionalmente se ha prestado especial atención a los cambios endocrinos, estructurales, fisiológicos y psicológicos que se producen durante la adolescencia, debido a la rapidez con la que estos se suceden en torno a la pubertad (Malina & Bouchard, 1991).

Tanto en el caso de los chicos como de las chicas, el inicio de la pubertad se asocia a un aumento de la actividad de las glándulas sexuales, adrenales y tiroidea, que se traduce en un aumento de la producción de las hormonas que catalizan los cambios puberales (Beunen et al., 2006). Más concretamente, en el caso de los chicos, se produce un aumento drástico en la concentración de la testosterona, llegando a ser 30 veces superior a los valores de etapas anteriores, lo que favorece el desarrollo de los caracteres sexuales, así como el aumento de la estructura ósea, influenciada por la hormona de crecimiento (GH), la masa corporal y la masa muscular mayoritariamente (Handelsman et al., 2018; Malina & Bouchard, 1991). En cambio, el inicio de la pubertad en las chicas se asocia un aumento en las concentraciones de estrógenos, que a su vez se encuentran estrechamente relacionados con el tejido adiposo presente antes del comienzo de esta etapa y con la distribución del mismo en etapas posteriores, además de influir en el desarrollo de los caracteres sexuales femeninos (Biro et al., 2014; Garnett et al., 2004).

Sin embargo, existen diferencias entre sexos, habiéndose identificado el inicio de la etapa prepuberal entre los 8.2-10.3 años en las chicas, mientras que en los chicos se encontró entre los 10.3 y los 12.1 años, observándose la edad a la que se produce el pico de crecimiento (EPVC) a los 11.4-12.2 y 13.8-14.4 años respectivamente (Beunen & Malina, 1988; Beunen et al., 2006; Malina & Bouchard, 1991). La EPVC ha sido definida como la edad a la que se produce un aumento drástico del ritmo de crecimiento en cuanto a la talla y la masa corporal de los adolescentes (Malina & Bouchard, 1991). Esta se caracteriza por un aumento de la talla a un ritmo aproximado de 9 cm/año y 10.3 cm/año, y un aumento de la masa corporal de 8.3 Kg/año y 9 Kg/año en niñas y niños respectivamente (Kelch & Beitins, 1994; Tanner, 1990).

Tanto la maduración, como el crecimiento y el desarrollo suelen ser comparados con la edad cronológica del individuo, entendida como el tiempo transcurrido desde el nacimiento hasta un día concreto (Lloyd et al., 2014), ya que no todos los individuos con la misma edad cronológica manifiestan los cambios asociados a la maduración de forma simultánea, existiendo evidencias de los diferentes ritmos de maduración entre individuos (Marshall & Tanner, 1968, 1969, 1970). Por otro lado, la edad biológica ha sido definida como la edad correspondiente al desarrollo de los cambios marcados por el desarrollo de la maduración biológica (Malina & Bouchard, 1991), pudiendo dar lugar a diferencias entre la edad cronológica y la edad biológica. Es el desfase entre la edad biológica y la edad cronológica lo que da lugar a los diferentes ritmos de maduración.

Factores asociados a la maduración

Y es que estos procesos de maduración biológica y los indicadores que se manifiestan durante su desarrollo han demostrado tener un alto nivel de dependencia respecto a la genética (Thomis & Towne, 2006), pero también existen factores que pueden favorecer variaciones en el tiempo en el que se produce la maduración (Beunen et al., 2006). La nutrición es uno de los factores que puede afectar al ritmo de la maduración, habiéndose observado que una adecuada nutrición no tiene grandes efectos sobre el proceso madurativo, pero que la desnutrición si puede retrasar el desarrollo esquelético de los adolescentes (Malina & Bouchard, 1991). Otro factor que podría modificar el ritmo de la maduración es la cantidad de tejido adiposo presente antes de la etapa puberal, ya que se ha observado una relación entre el sobrepeso y la obesidad con un inicio más temprano de la maduración, siendo esta relación más marcada en las chicas (Beunen et al., 2006).

Hay más debate sobre la influencia de la práctica sistemática de ejercicio físico como modificador del ritmo de maduración. En este sentido, mientras que por un lado se ha observado como las atletas femeninas de élite de disciplinas estéticas suelen mostrar un proceso madurativo más tardío, lo que podría estar asociado a los bajos niveles de tejido adiposo y a la baja disponibilidad de energía durante largos periodos de tiempo (Beunen & Malina, 1996), la mayoría de los autores concluyen que no existe evidencia de que la práctica sistemática y continuada de ejercicio físico tenga un efecto relevante sobre el ritmo de maduración de los niños y adolescentes (Beunen & Malina, 1996).

Influencia de la maduración biológica en el rendimiento deportivo

En ciencias del deporte, el estudio de la maduración biológica en relación con el rendimiento deportivo ha sido un tema que ha despertado el interés tanto de los entrenadores como de la comunidad científica durante décadas, debido a la influencia que ésta tiene sobre variables directamente relacionadas con el rendimiento (Albaladejo-Saura et al., 2021).

En las distintas modalidades deportivas, cuando se trata de etapas de formación, se ha agrupado a los deportistas de acuerdo con su edad cronológica para tratar de confeccionar un proceso de formación estándar y un sistema de competición que resulte equitativo para sus participantes (Gutiérrez-Díaz del Campo, 2013). A pesar de esto, las diferencias en el ritmo de maduración individual hacen que se haya observado en distintas disciplinas deportivas, individuales y colectivas, como en fútbol, baloncesto, voleibol, balonmano, piragüismo o tenis, que los deportistas más maduros presentan mayores valores en variables antropométricas como la talla, la masa corporal y las variables relacionadas con la estructura ósea y la masa muscular, así como mejores resultados en variables de rendimiento físico como la fuerza y la potencia del tren superior e inferior, la velocidad de desplazamiento o la agilidad (Albaladejo-Saura et al., 2022a; Albaladejo-Saura et al., 2022b; Albaladejo-Saura et al., 2021; Carvalho et al., 2017; Matthys et al., 2012; Söğüt et al., 2019).

Estas diferencias ocasionadas por los distintos ritmos de maduración han demostrado ocasionar una ventaja en las competiciones y procesos de selección que ocurren durante la etapa adolescente para los deportistas más maduros respecto a sus pares de la misma categoría de edad, aunque estas diferencias tiendan a igualarse hacia el final del proceso madurativo (Dugdale, McRobert, et al., 2021; Dugdale, Sanders, et al., 2021; Vaeyens et

al., 2008) Es por ello que cada vez más programas de identificación de talento deportivo abogan por la inclusión de variables de maduración biológica, como la EPVC o el desfase madurativo respecto a la edad cronológica, como parte de las características a evaluar en los deportistas (Johnston et al., 2018), aunque no existe consenso sobre qué método utilizar para su evaluación.

Introducción a los métodos de estimación de la maduración biológica

Debido a este interés en conocer las diferencias en la maduración biológica, se han desarrollado numerosos métodos con el objetivo de estimar el desfase de maduración biológica respecto a la edad cronológica o identificar el estadio madurativo en el que se encuentra el individuo (Malina et al., 2015). Dentro de los métodos más empleados, se encuentran aquellos basados en el desarrollo de los caracteres sexuales secundarios, dando lugar a clasificaciones en función del estadio de maduración sexual (Marshall & Tanner, 1969, 1970); los basados en el desarrollo esquelético durante la niñez y adolescencia, para establecer una clasificación de la edad esquelética (Greulich & Pyle, 1959; Tanner et al., 1975); aquellos que emplean medidas antropométricas para estimar la EPVC como medida de la maduración somática (Mirwald et al., 2002; Moore et al., 2015); o el estudio de la maduración dental para evaluar el estadio en el que se encuentra el individuo (Demirjian & Goldstein, 1976; Demirjian et al., 1973).

Como consecuencia de esto, existe un extenso debate acerca de la idoneidad de los distintos métodos para estimar la maduración biológica en el campo de estudio de las ciencias del deporte. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es realizar una revisión bibliográfica sobre los métodos de estimación de la maduración biológica más empleados en ciencias del deporte.

Métodos para la evaluación de la maduración

Para realizar una evaluación de la maduración biológica se puede atender a distintos indicadores que experimentan cambios en el transcurso de ésta. Dentro de los indicadores más comúnmente utilizados en ciencias del deporte se encuentran la maduración esquelética, evaluada por medio de métodos radiográficos; la maduración somática (basada en la velocidad del crecimiento), evaluada por medio de métodos antropométricos; la maduración sexual, evaluada por medio de métodos de desarrollo de caracteres sexuales secundarios; y la maduración dental, evaluada a través de radiografías dentales.

Estudio de la maduración esquelética

La valoración de la edad esquelética es uno de los indicadores más empleados como estudio de la maduración biológica. Estos métodos se basan en la realización de radiografías de puntos óseos considerados de interés y la comparación de estas radiografías con modelos de referencia preestablecidos, rigiéndose por el principio de la progresiva calcificación de las epífisis de los huesos estudiados con el transcurso de la maduración (Greulich & Pyle, 1959; Roche et al., 1988; Tanner et al., 1975).

En este sentido, existen tres modelos que han sido los más utilizados a lo largo de los años:

1. *Greulich & Pyle method*: El método descrito por Greulich & Pyle (1959) es un método basado en un atlas de imágenes de referencia estandarizadas, tomadas en una población de niños y niñas caucásicos, en diferentes etapas

de maduración desde el nacimiento hasta el desarrollo esquelético adulto, separadas entre sí en periodos de tiempo de un año o medio año. Este método implica la radiografía de la mano y muñeca izquierdas del individuo, para posteriormente ser comparada con las imágenes de referencia para determinar la edad esquelética que le corresponde. De este modo, si la radiografía tomada coincide con una de edad esquelética superior a la edad cronológica del individuo, será categorizado como madurador temprano, mientras que, si coincide con una de edad cronológica inferior, será categorizado como madurador tardío. Este método sigue siendo utilizado de acuerdo al protocolo descrito originalmente, y fue validado en una población de niños americanos caucásicos (Greulich & Pyle, 1959). *Tanner-Whitehouse 1, 2 & 3*: El método propuesto por Tanner & Whitehouse (1975) está basado en la valoración mediante radiografía de la mano y la muñeca izquierdas, y la categorización de 13 o 20 huesos en diferentes regiones de interés, para posteriormente aplicar una serie de criterios relativos a la descripción y forma de los huesos analizados. Finalmente se obtiene un valor de edad esquelética, resultante de las valoraciones de la maduración de cada hueso de forma individual, que posteriormente es comparado a la edad cronológica del individuo valorado. De este modo, si el resultado de la edad esquelética es mayor a la edad cronológica del individuo, será clasificado como madurador temprano, mientras que si es menor será clasificado como madurador tardío. Este método, que ha sido revisado en tres ocasiones (TW1, TW2 y TW3), ha sido validado en una población de niños de origen británico (TW1 y TW2) y en poblaciones europeas, sudamericanas, norteamericanas y japonesas (Tanner et al., 1975; Tanner et al., 2001).

2. *Fels study protocol*: Este método propuesto por Roche et al. (1988) se basa en la radiografía de mano y muñeca izquierdas, proponiendo indicadores de referencia en los huesos cúbito, radio, carpo, metacarpo y falanges del primer y quinto dedo. En este método se atribuye una graduación a cada hueso de acuerdo con la edad y el sexo de los participantes, incluyendo ratios entre la longitud y la anchura de los huesos largos y la osificación de los huesos medidos. Estos valores se utilizan para estimar la edad esquelética de cada individuo, para posteriormente, al ser comparada con la edad cronológica, clasificar a los individuos como maduradores tempranos o tardíos. Este método sigue siendo utilizado de acuerdo al protocolo descrito originalmente, y fue validado en una población de niños americanos caucásicos a los que se les realizó un seguimiento longitudinal de distintos indicadores madurativos (Roche et al., 1988).

Estudio de la maduración somática

Otro de los indicadores más empleados para valorar la maduración biológica es el estudio de la maduración somática. Esta se basa en la identificación del pico de velocidad de crecimiento (PVC) resultante del aumento en la concentración de GH, hormona tiroidea y andrógenos

y los cambios que provocan en la talla, el peso y la proporcionalidad de los distintos segmentos corporales (Malina & Bouchard, 1991). Estos métodos se caracterizan por la posibilidad de observar de forma directa el inicio del PVC en estudios longitudinales, caracterizado por un crecimiento de aproximadamente 9 cm/año en las chicas y de 10,3 cm/año en los chicos, mediante la realización de medidas antropométricas de forma continuada y su comparación con valores de referencia (Kelch & Beitins, 1994). Sin embargo, en los casos en los que los diseños transversales imposibiliten la toma de medidas repetidas existe la posibilidad de estimar la EPVC mediante medidas antropométricas, introducidas posteriormente en fórmulas de regresión. Dentro de los métodos de estimación mediante medidas antropométricas, los más empleados son:

1. **Método de Mirwald et al.:** El método propuesto por Mirwald et al. (2002) está basado en las diferentes ratios de crecimiento existentes entre la talla tronco-encefálica y la longitud del miembro inferior, así como el efecto que tiene este crecimiento sobre la talla total del individuo y la masa corporal entorno al PVC. De este modo, se crearon dos ecuaciones diferenciadas por sexos en las que se introducen como variables para el cálculo la edad cronológica, la masa corporal, la talla y la talla sentado del individuo y la longitud del miembro inferior. Estas fórmulas dan como resultado el desfase de

la maduración biológica, que restado a la edad cronológica aporta la estimación de la EPVC. Las ecuaciones de predicción fueron desarrolladas en la población incluida en el estudio Saskatchewan Pediatric Bone Mineral Accrual Study (113 chicos y 115 chicas) (Mirwald et al., 2002).

2. **Método de Moore et al.:** El método propuesto por Moore et al. (2015) se basa en los mismos principios que identifican el cambio de velocidad en el ritmo de crecimiento de los adolescentes, mediante el estudio de la proporcionalidad entre el tronco y el miembro inferior, para crear ecuaciones de regresión para la estimación del EPVC. En él se proponen dos fórmulas diferenciadas por sexos, en las que se incluyen como variables independientes la edad y la talla sentado en el caso de los chicos y la edad y la talla en el caso de las chicas, para estimar desfase de la maduración biológica y posteriormente el EPVC. La validez de las fórmulas fue comparada con las poblaciones de dos estudios externos, el Harpenden Growth Study (419 chicos y 282 chicas británicas) y el HBS-III study (515 chicos y 556 chicas canadienses) (Moore et al., 2015).

Se pueden observar las fórmulas resultantes de cada método en la tabla 1.

Tabla 1. Métodos de estimación de la maduración mediante estudio de edad a la que se produce el pico de velocidad de crecimiento a través de variables antropométricas

Autores	Fórmula (desfase madurativo)	Indicadores de validez	Población de validación
Mirwald et al. (2002)	Chicos= $-9.232+0.0002708*(LMI*TS)-0.001663*(Edad*LMI)+0.007216*(Edad*TS)+0.02292*(MC/T)$	$R^2 = .891$ $SEE = 0.592$	228 participantes del estudio Saskatchewan Pediatric Bone Mineral Accrual Study (113 chicos; 115 chicas)
	Chicas= $-9.37+0.0001882*(LMI*TS)-0.0022*(Edad*LMI)+0.005841*(Edad*TS)-0.002658*(Edad*MC)+0.07693*(MC/T)$	$R^2 = .890$ $SEE = 0.569$	
Moore et al. (2015)	Chicos= $-8.128741+(0.0070346*(Edad*TS))$	$R^2 = .906$ $SEE = 0.514$	1071 participantes del estudio HBS-III (515 chicos; 556 chicas)
	Chicas= $-7.709133+(0.0042232*(Edad*T))$	$R^2 = .898$ $SEE = 0.528$	

LMI: Longitud del miembro inferior; TS: Talla sentado; T: Talla; MC: Masa corporal; SEE: Error estándar estimado.

Estudio de la maduración sexual

La evaluación de la maduración sexual como indicativo de la maduración biológica se basa en el paulatino desarrollo de los caracteres sexuales secundarios masculinos y femeninos que se inician con el aumento de las hormonas sexuales que se producen durante la etapa prepuberal (Marshall & Tanner, 1969, 1970).

Dentro del estudio de la maduración sexual, el más empleado es el propuesto por Marshall y Tanner (1969, 1970). En él se confeccionó una clasificación de cinco estadios basándose en dos escalas para cada sexo, centradas en el desarrollo de vello púbico tanto en los chicos como en las chicas, el desarrollo genital en el caso de los chicos y el desarrollo del tejido mamario en el caso de las chicas, contando con imágenes y descripción de cada uno de los estadios y las escalas propuestas. Esta metodología se ha propuesto para ser desarrollada durante un examen físico o para ser autocumplimentada por los sujetos (Marshall & Tanner, 1969, 1970).

Estudio de la maduración dental

El estudio de la maduración dental también ha sido considerado como un indicador de la maduración biológica debido a los diferentes estadios por los que pasa el desarrollo de los dientes definitivos desde su calcificación, marcando el inicio de la maduración, hasta que el extremo apical del canal radicular dental está completamente cerrado, marcando el final (Demirjian & Goldstein, 1976; Demirjian et al., 1973).

En este sentido, Demirjian & Goldstein (1976), desarrollaron un sistema de clasificación, mediante el empleo de radiografía panorámica, de la maduración dental dividiendo el proceso en ocho fases que es posible aplicar a cada pieza dental. En esta metodología, se clasifica cada pieza dental en una escala de ocho valores para posteriormente calcular un índice conjunto entre todos los dientes analizados en el que la suma máxima de los valores es 100. Mediante este valor se le atribuye al sujeto una edad biológica basada en su maduración dental, que posteriormente se compara con su edad cronológica para establecer su desfase madurativo. Para ello, incluyen

tanto imágenes como una descripción de las características que deben reunir las piezas dentales para ser incluidas en cada uno de los grupos propuestos. Este método fue confeccionado con una muestra de 1446 chicos y 1482 chicas canadienses.

Consideraciones en el uso de los métodos de valoración de la maduración biológica en deportistas adolescentes

Cabe destacar que todos los métodos descritos con anterioridad han sido desarrollados y validados en primera instancia en un contexto clínico, en poblaciones de distintas edades no específicamente deportistas. Se puede encontrar un resumen de las características principales y las ventajas e inconvenientes de cada método en la tabla 2.

Tabla 2. Resumen de las características de los principales métodos de estimación de la maduración biológica y su adecuación al campo de estudio de las ciencias del deporte

Tipo de método	Rapidez de medición	Coste económico	Facilidad de implementación	Adecuación al ámbito de ciencias del deporte	
				Ventajas	Inconvenientes
Maduración esquelética: Radiografía de mano y muñeca según Greulich & Pyle (1969)	*	***	*	Considerado "gold standard" para la estimación de la maduración biológica en ciencias del deporte, en contextos en los que se tenga acceso a su utilización.	No cuenta con la capacidad de adaptarse a investigaciones de campo, a la necesidad de personal especializado, al tiempo y al coste de su aplicación y a la radiación a la que se exponen los participantes
Maduración esquelética: Radiografía de mano y muñeca según Tanner & Whitehouse (1975)	*	***	*	Considerado "gold standard" para la estimación de la maduración biológica en ciencias del deporte, en contextos en los que se tenga acceso a su utilización.	No cuenta con la capacidad de adaptarse a investigaciones de campo, a la necesidad de personal especializado, al tiempo y al coste de su aplicación y a la radiación a la que se exponen los participantes
Maduración esquelética: Radiografía de mano y muñeca según Roche et al. (1988)	*	***	*	Considerado "gold standard" para la estimación de la maduración biológica en ciencias del deporte, en contextos en los que se tenga acceso a su utilización.	No cuenta con la capacidad de adaptarse a investigaciones de campo, a la necesidad de personal especializado, al tiempo y al coste de su aplicación y a la radiación a la que se exponen los participantes
Maduración somática: Medidas antropométricas según Mirwald et al. (2002)	**	**	**	Método de fácil implementación, adaptable a trabajos de campo y que requiere poca formación por parte de los investigadores	Se deben tener en cuenta sus limitaciones para no introducir excesivo error en la estimación. Puede subestimar o sobreestimar el valor del desfase madurativo en los maduradores temprano o tardíos respectivamente. Es recomendable su uso para clasificar a los deportistas según su ritmo de maduración.

Maduración somática: Medidas antropométricas según Moore et al. (2015)	**	**	**	Método de fácil implementación, adaptable a trabajos de campo y que requiere poca formación por parte de los investigadores	Se deben tener en cuenta sus limitaciones para no introducir excesivo error en la estimación. Puede subestimar o sobreestimar el valor del desfase madurativo en los maduradores temprano o tardíos respectivamente. Es recomendable su uso para clasificar a los deportistas según su ritmo de maduración.
Maduración somática: Medidas antropométricas según Sherar et al. (2005)	**	**	***	Método de fácil implementación, adaptable a trabajos de campo y que requiere poca formación por parte de los investigadores	Requiere la realización de medidas antropométricas de forma repetida en lapsos de tiempo de entre tres y 18 meses durante varios años y el posterior análisis individual de las curvas de crecimiento para poder obtener el resultado de la EPVC.
Maduración sexual: Caracteres sexuales según Marshall & Tanner (1969, 1970)	***	*	***	Es un método fácil de implementar que no requiere instalaciones específicas, tiene un coste bajo, es rápido de realizar y puede ser autocumplimentado por el sujeto.	Puede ser considerado invasivo para la privacidad del individuo descontextualizado del ámbito clínico. Puede perder fiabilidad cuando se realiza de forma autocumplimentada por los sujetos.
Maduración dental: Radiografía dental según Demirjian & Goldstein (1976)	*	***	*	Tiene una fiabilidad y validez similar a los métodos radiográficos de mano y muñeca para evaluar la maduración biológica del sujeto.	Cuenta con extrema especificidad en cuanto a campos de estudio abarcados. No es posible adaptarlo a investigaciones de campo, precisa de personal altamente especializado y expone a radiación a sus participantes.

*: bajo; **: medio; ***: alto.

Métodos basados en la maduración esquelética

Los métodos basados en radiografías han sido ampliamente utilizados en población deportista (Carling et al., 2012; Figueiredo et al., 2009; Gouvea et al., 2016; Söğüt et al., 2019; Valente-Dos-Santos et al., 2014). En ellos, el objetivo es obtener el valor de la edad biológica del sujeto en el momento de la medición, sirviéndose de la maduración esquelética como indicador de la maduración biológica del sujeto, que posteriormente será comparada con la edad cronológica para conocer el desfase madurativo. Estos métodos han sido considerados el "gold standard" para la estimación de la maduración biológica, debido a la gran cantidad de datos disponibles, a la reproducibilidad de los métodos, a la posibilidad de realizar el estudio desde la infancia hasta la adolescencia tardía o la adultez y a la consistencia en los resultados respecto a las curvas de desarrollo observadas en estudios longitudinales (Malina et al., 2015). Sin embargo, debido a las diferencias en los criterios de valoración de la maduración esquelética de los que se sirven para analizar la maduración biológica, estos métodos cuentan con ventajas e inconvenientes propios que hacen que no se pueda identificar uno de ellos como "gold standard" dentro de los métodos de maduración esquelética (Malina et al., 2015). Por otro lado, ninguno de los tres métodos descritos en la presente revisión puede destacarse como el más empleado en ciencias del deporte, ya que estos métodos se han empleado para valorar la maduración biológica de deportistas jóvenes independientemente de la disciplina deportiva (Albaladejo-Saura et al., 2021; Malina, 2011).

Estos métodos se han usado tanto para analizar la maduración biológica de los participantes de forma descriptiva, como para clasificarlos como maduradores tempranos, en tiempo, o tardíos, utilizando para ello la diferencia entre la edad esquelética y edad cronológica (Carling et al., 2012). Cuando se pretende clasificar a los deportistas adolescentes en base a la edad biológica evaluada mediante estos métodos, el procedimiento más habitual es restar maduración esquelética - edad

cronológica y con el resultado establecer un rango de ± 1 año (diferencia de >-1 a $<+1$) en el que se situarían los deportistas cuya maduración se considera en tiempo, mientras que si la diferencia es positiva y mayor a un año (diferencia $>+1$) se considerarían maduradores tempranos, y si la diferencia es negativa y mayor a un año (diferencia <-1), maduradores tardíos (Carling et al., 2012; Figueiredo et al., 2009). Existen otras propuestas de clasificación de la maduración biológica en función de la edad esquelética, como la clasificación en más maduros o menos maduros, sin grupo de maduradores en tiempo, atendiendo a si el resultado de la resta entre la edad esquelética y la edad cronológica es positivo o negativo, que son menos empleados (Söğüt et al., 2019).

A pesar de los beneficios de los métodos basados en radiografía, cabe destacar que no están exentos de limitaciones. Los tres métodos más empleados, propuestos por Greulich & Pyle (1959), Tanner & Whitehouse (1975) y Roche et al. (1988) están basados en los mismos principios para categorizar la maduración ósea, pero debido a las diferencias en la metodología empleada para obtener la maduración esquelética se considera que no son intercambiables entre sí (Malina et al., 2015).

Por otro lado, resultan métodos con un alto coste económico, que conllevan una gran cantidad de tiempo para poder ser implementados y no son adaptables a mediciones fuera del contexto de laboratorio, lo que limita su uso en el contexto de ciencias del deporte (Malina et al., 2015; Towlson et al., 2021). Además, estos métodos precisan ser empleados por personal especializado que cuente con la cualificación necesaria para llevarlos a cabo, ya que de otra forma su validez y fiabilidad descende (Lloyd et al., 2014; Towlson et al., 2021). Al tratarse de métodos basados en el empleo de rayos-X, algunos autores defienden que son métodos invasivos cuyo uso no está justificado en adolescentes, puesto que consideran que sólo se debería aplicar radiación a individuos en crecimiento en el contexto de un diagnóstico clínico, no estando justificado en la investigación en ciencias del deporte (Gómez-Campos et al., 2013). Sin embargo, otros

autores sí abogan por su uso, justificando que, con las técnicas e instrumentos actuales, la radiación a la que se somete al individuo durante la valoración es mínima, y no supondría una cantidad perjudicial para la salud (Malina et al., 2015). Estas limitaciones hacen que sea un método accesible principalmente para deportes con un alto nivel de ingresos económicos o acceso a las instalaciones adecuadas, como es el caso del fútbol (Carling et al., 2012; Figueiredo et al., 2009; Gouvea et al., 2016; Valente-Dos-Santos et al., 2014).

Métodos basados en la maduración somática

Los métodos de estimación de la maduración somática basados en las medidas antropométricas son unos de los más usados en la valoración de deportistas adolescentes debido a que son métodos poco invasivos, a su facilidad de uso, la posibilidad de realizar las mediciones tanto en investigaciones de laboratorio como de campo, el bajo coste del material necesario para su implementación y el relativo poco entrenamiento que se necesita por parte de los investigadores (Albaladejo-Saura et al., 2022a, 2022b, 2022c; Arede et al., 2019; Guimarães et al., 2019; Hammami et al., 2018). En ellos, el indicador de la maduración biológica es el ritmo de crecimiento y la edad a la que se produce el incremento en la velocidad del crecimiento, en comparación con la edad cronológica del sujeto. Estos métodos no permiten la estimación de la edad biológica del sujeto en el momento de la medición, sino que son indicativo del ritmo de la maduración biológica (Drenowatz et al., 2010; Drenowatz et al., 2013).

Estos métodos, de forma similar a los métodos radiológicos, se han utilizado de forma descriptiva en poblaciones de deportistas adolescentes (Albaladejo-Saura et al., 2022c) o para clasificarlos como maduradores tempranos, en tiempo o tardíos (Albaladejo-Saura et al., 2022a; Albaladejo-Saura et al., 2022b; Arede et al., 2019; Guimarães et al., 2019; Hammami et al., 2018).

En este caso, existen algunas diferencias marcables entre los métodos basados en la observación del PVC y los que realizan su estimación a través de fórmulas. En el caso del método de observación del PVC, es necesaria la realización de varias sesiones de medición, espaciadas entre sí entre 3 y 18 meses para poder establecer la velocidad de crecimiento del individuo, a lo largo de los años en los que se produce de forma teórica el PVC para poder identificarlo en relación a las curvas de crecimiento observadas (Kelch & Beitins, 1994; Malina & Bouchard, 1991; Sherar et al., 2005; Tanner, 1990).

Sin embargo, este método también cuenta con limitaciones. La principal limitación encontrada es que es un método disponible únicamente para diseños experimentales longitudinales de larga duración, debido a la necesidad de espaciar en el tiempo las mediciones realizadas (Kelch & Beitins, 1994; Malina & Bouchard, 1991; Sherar et al., 2005; Tanner, 1990). Por otro lado, debido a la metodología empleada, el rango de edad en el que este método es aplicable se reduce a los años entorno al PHV, teniendo además que realizarse un estudio individualizado de la curva de crecimiento debido a las variaciones individuales (Sherar et al., 2005).

Por el contrario, en las fórmulas desarrolladas por Mirwald et al. (2002) y Moore et al. (2015), sólo es necesario que se evalúen las medidas antropométricas una única vez, ya que, en las fórmulas propuestas, una de las variables de predicción es la edad cronológica del sujeto en el momento de la valoración. Estas fórmulas ofrecen como resultado el tiempo en años que falta hasta que el individuo valorado alcance el PVC (si el resultado es negativo) o el tiempo en años que ha pasado desde que el individuo ha pasado el PVC (si el resultado es positivo), denominado

desfase madurativo. El desfase madurativo, restado a la edad cronológica del individuo es utilizado para calcular la EPVC (EPVC = edad cronológica - desfase madurativo) (Mirwald et al., 2002; Moore et al., 2015). Este valor se puede utilizar directamente para categorizar a los deportistas en maduradores tempranos, en tiempo o tardíos, de acuerdo con diferentes criterios.

Tradicionalmente se han usado los rangos indicados por Malina & Bouchard (1991) en los que típicamente se observa el PVC, a los 11,4-12,2 para las chicas y 13,8-14,4 para los chicos, para clasificar a los deportistas como maduradores tempranos, cuando su EPVC se encontraba dentro del rango indicado; maduradores tempranos cuando su EPVC era menor al rango indicado; y tardíos cuando su EPVC era superior al rango indicado. Sin embargo, este criterio de evaluación cuenta con la limitación de que, como se ha observado en investigaciones recientes, la estimación de la EPVC puede verse alterada por la edad cronológica (Malina, Coelho-E-Silva, et al., 2021; Towlson et al., 2021), por lo que solo sería válido para poblaciones en un rango de edad reducido, que se encontrase en torno a la EPVC teórica.

Actualmente, debido a la heterogeneidad que es posible encontrar en los grupos de adolescentes evaluados en ciencias del deporte en cuanto a la edad cronológica, los métodos de clasificación más utilizados basan su criterio en el cálculo de la EPVC, estableciendo los rangos que marcan la agrupación como maduradores tempranos, en tiempo o tardíos en la media y la desviación estándar (*DT*) del grupo respecto a esta variable (Figueiredo et al., 2009; Hammami et al., 2018; Mirwald et al., 2002; Moore et al., 2015). De esta forma, hay autores que proponen un rango de ± 1 año en la EPVC respecto a la media del grupo, en el que se situarían los deportistas cuya EPVC se considera en tiempo, mientras que si la EPVC tiene una diferencia mayor a un año tanto por debajo como por encima del de la media se considerarían maduradores tempranos y tardíos, respectivamente (Hammami et al., 2018; Mirwald et al., 2002; Moore et al., 2015). El establecimiento del criterio de un rango de ± 1 año respecto a la EPVC del grupo para clasificar a los deportistas en los distintos grupos de maduración se debe a que las muestras en las que fueron validadas las fórmulas de Mirwald et al. (2002) y Moore et al. (2015) mostraron una *DT* ≈ 1 año cuando se evaluó su maduración biológica mediante radiografía. Pero el establecimiento de este rango tiene ciertas limitaciones cuando las muestras son homogéneas, ya que, si la *DT* de la EPVC del grupo es menor a 1 año, casi todos los deportistas serían clasificados como maduradores en tiempo. Es por ello que cuando la *DT* de la EPVC del grupo sea menor a 1 año, algunos autores han propuesto la utilización de rangos de $\pm 0,5$ años de la EPVC, encontrándose dentro de este rango los considerados maduradores en tiempo, por debajo de ese rango los maduradores tempranos y por encima de ese rango los maduradores tardíos (Albaladejo-Saura et al., 2022a, 2022b; Arede et al., 2019; Drenowatz et al., 2010; Guimaraes et al., 2019; Wickel & Eisenmann, 2007).

Sin embargo, las fórmulas de estimación del EPVC también cuentan con limitaciones que se deben tener en cuenta. Por un lado, a pesar de ser métodos muy utilizados en ciencias del deporte y contar con buenos índices de validez (*R* = .896 - .890) (Albaladejo-Saura et al., 2021; Mirwald et al., 2002; Moore et al., 2015), se ha observado que suelen introducir cierto grado de error que limita su uso en ocasiones ya que están basados en ecuaciones de regresión (*error estándar* = 0.542-0.569 años) (Malina et al., 2016; Malina, Coelho-E-Silva, et al., 2021). Por otro lado, se ha observado que las ecuaciones tienden a subestimar el valor del desfase de la maduración para los maduradores tempranos, mientras

que lo sobrestiman para los maduradores tardíos (Towilson et al., 2021). Debido a estas limitaciones, algunos autores han recomendado utilizar estos métodos solamente en población adolescente, limitando su uso en población infantil (Malina, Coelho-E-Silva, et al., 2021; Towilson et al., 2017; Towilson et al., 2021), controlar el efecto de la edad cronológica en las estimaciones ya que se ha observado que la estimación de la maduración somática cambia de forma estable con el avance de la edad, y utilizar los métodos basados en antropometría para clasificar a los deportistas en maduradores tempranos, en tiempo o tardíos, en lugar de como medida descriptiva de la maduración biológica, ya que indican el ritmo de maduración permitiendo la comparación entre individuos, pero no el cálculo de la edad biológica (Malina, Coelho-E-Silva, et al., 2021). A pesar de estas limitaciones, se ha recomendado su uso en población deportista adolescente cuando el método "gold standard" sea imposible de utilizar (Towilson et al., 2021)

Métodos basados en la maduración sexual

Los métodos basados en el desarrollo de caracteres sexuales secundarios también han sido empleados en los estudios realizados en población deportista (Figueiredo et al., 2009; Matta et al., 2014). En estos métodos, el indicador de la maduración biológica es el grado de desarrollo que los caracteres sexuales secundarios presentan en comparación con la escala propuesta en el momento de la valoración. Sin embargo, son menos usados que los métodos basados en la maduración esquelética o somática (Albaladejo-Saura et al., 2021). El método descrito por Marshall & Tanner (1962) clasifica en cinco estadios el desarrollo de los caracteres sexuales secundarios, atribuyéndosele al estadio 1 un tiempo anterior a la pubertad (prepuber), los estadios 2-4 se consideran el desarrollo de la pubertad, y el estadio 5 el desarrollo adulto (Gómez-Campos et al., 2013). Los estadios de maduración sexual se han relacionado también con otros indicadores de maduración biológica, como con el "gold standard" (Figueiredo et al., 2009). Así se observó que los participantes clasificados como maduradores tardíos de entre 11 y 12 años fueron mayoritariamente clasificados en el estadio pre-puber (88%) del método descrito por Marshall & Tanner (1969, 1970), mientras que los clasificados como maduradores en tiempo y tempranos de 13 y 14 años de edad cronológica se encontraron entre los estadios 3 y 4 del mencionado método.

Este método cuenta con la ventaja de su facilidad de aplicación, al tratarse de un set de imágenes con el que comparar el estado actual de los caracteres del individuo, así como al proponer la posibilidad de que sea el propio sujeto el que realice la evaluación (Marshall & Tanner, 1969, 1970).

Las características específicas de la evaluación de la maduración sexual hacen que se deban tener en cuenta los posibles inconvenientes cuando se pretenda emplear esta metodología. Se debe tener en cuenta que su uso está limitado a la etapa prepuberal y puberal, ya que fuera de ese rango no se detallan categorías para la clasificación de las características de los individuos (Marshall & Tanner, 1969, 1970). Por otro lado, una de las limitaciones principales cuando se pretende su uso en el ámbito de ciencias del deporte es que se trata de una técnica invasiva para el participante debido a los aspectos que se valoran para la clasificación, en la que se deben tener en cuenta los aspectos éticos y culturales (Gómez-Campos et al., 2013). Esto es debido a que es una metodología originalmente desarrollada para ser llevada a cabo en el contexto clínico, en exploración física del paciente por parte de personal sanitario (Marshall & Tanner, 1968). Para tratar de solventar este problema, en ocasiones se ha abogado

por la autovaloración por parte del participante, hecho que podría disminuir la validez y fiabilidad del instrumento (Gómez-Campos et al., 2013).

Métodos basados en radiografías dentales

Los métodos basados en la maduración dental son ampliamente utilizados en contextos clínicos, odontológicos, forenses y antropológicos (De Donno et al., 2021), siendo el más empleado el propuesto por Demirjian & Goldstein (1976), mientras que en contextos de valoración deportiva su uso está menos extendido (Albaladejo-Saura et al., 2021; Beunen et al., 2006; Johnston et al., 2018; Malina, Martinho, et al., 2021). Este método utiliza el desarrollo dental como indicador de la maduración biológica. Este método comparte las ventajas de los métodos de estimación de la edad esquelética, contando con una gran reproducibilidad, un amplio rango de edades de implementación desde la infancia hasta la etapa adulta, y la consistencia en los resultados respecto a las curvas de crecimiento observado (De Donno et al., 2021; Demirjian & Goldstein, 1976; Demirjian et al., 1973; Gómez-Campos et al., 2013).

Sin embargo, también cuenta con similares limitaciones. Utilizan rayos-X para la valoración, lo que implica la exposición a radiación que no estaría justificada en los estudios en ciencias del deporte (Gómez-Campos et al., 2013), su uso requiere mucho tiempo, instalaciones específicas, personal cualificado y conlleva un alto gasto económico (De Donno et al., 2021; Malina et al., 2015), razones por las que su uso en los estudios en deportistas jóvenes podría ser escaso.

Limitaciones y futuras líneas de investigación

La presente investigación no se encuentra exenta de limitaciones. En ella se han revisado los métodos más empleados en la valoración de distintos indicadores de la maduración biológica en el contexto deportivo. Sin embargo, existen otros métodos de valoración de la maduración biológica que no se han analizado, como los métodos radiográficos de estructuras óseas distintas a la mano y la muñeca, o los métodos basados en el análisis de la concentración hormonal, más empleados en el contexto clínico. Por otro lado, tampoco se han analizado los métodos menos empleados o que carecieran de suficiente validación.

Futuras revisiones sobre los métodos de estimación de la maduración biológica podrían abordar la inclusión de los distintos métodos, independientemente del contexto en el que sean utilizados.

Las líneas de investigación derivadas de la presente revisión podrían estar orientadas a analizar la validez, fiabilidad y adecuación de los distintos métodos de estimación respecto a las curvas de desarrollo observadas en estudios longitudinales, así como la inclusión de variables relacionadas con el rendimiento y la salud que puedan verse afectadas por las diferencias individuales en el desarrollo madurativo.

Conclusiones

En el ámbito deportivo, cuando se pretenden realizar evaluaciones de deportistas en edad de crecimiento, es indispensable tener en cuenta el estado madurativo de éstos, debido a la gran influencia que la maduración biológica tiene sobre numerosas variables asociadas de forma directa con el rendimiento. Existen métodos de estimación de la maduración que han mostrado ser herramientas útiles para llevar a cabo una valoración del proceso madurativo de los adolescentes, como son

la maduración ósea, somática, sexual y dental. En este sentido, el método avalado por la literatura científica como "gold standard" para la estimación de la maduración biológica en poblaciones de deportistas adolescentes es el método de maduración ósea, el cual se basa en la realización de radiografías de mano y muñeca, aunque se debe tener en cuenta que sus limitaciones, entre las que destacan el coste económico, el tiempo y las instalaciones requeridas para su implementación, la necesidad de evaluadores altamente cualificados y la radiación a la que se expone a los sujetos pueden condicionar su uso en la mayoría de las situaciones aplicables a los estudios en ciencias del deporte. En el caso de que el empleo del método radiográfico no se encuentre disponible, la valoración de la maduración somática a través de las fórmulas que emplean variables antropométricas para su cálculo son una opción ampliamente utilizada, fiable y válida, y además cuentan con las ventajas de su facilidad de aplicación y su adaptabilidad a investigaciones de campo. Sin embargo, se ha de tener en cuenta que estos métodos pueden introducir cierto error en la estimación, subestimar o sobreestimar el valor del desfase madurativo en los maduradores tempranos o tardíos respectivamente, y que es recomendable su uso para clasificar a los deportistas según su ritmo de maduración, puesto que los métodos de estimación de la maduración somática basados en antropometría son un indicador del ritmo de la maduración biológica, pero no de la edad biológica, lo que constituye una de sus principales limitaciones. Por último, la valoración de los caracteres sexuales y del desarrollo dental son métodos de estimación de la maduración menos utilizados en ciencias del deporte, principalmente por su carácter clínico, por las implicaciones éticas, y por la dificultad en su aplicación.

Bibliografía

- Albaladejo-Saura, M., Vaquero-Cristóbal, R., García-Roca, J. A., & Esparza-Ros, F. (2022a). Influence of biological maturation status on selected anthropometric and physical fitness variables in adolescent male volleyball players. *PeerJ*, 10, e13216. <https://doi.org/10.7717/peerj.13216>
- Albaladejo-Saura, M., Vaquero-Cristóbal, R., García-Roca, J. A., & Esparza-Ros, F. (2022b). Influence of maturity status on kinanthropometric and physical fitness variables in adolescent female volleyball players. *Applied Sciences*, 12, 4400.
- Albaladejo-Saura, M., Vaquero-Cristóbal, R., García-Roca, J. A., & Esparza-Ros, F. (2022c). The effect of age, biological maturation and birth quartile in the kinanthropometric and physical fitness differences between male and female adolescent volleyball players. *Children*, 9(1), 58.
- Albaladejo-Saura, M., Vaquero-Cristóbal, R., González-Gálvez, N., & Esparza-Ros, F. (2021). Relationship between biological maturation, physical fitness, and kinanthropometric variables of young athletes: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 18(1), 328. <https://doi.org/10.3390/ijerph18010328>
- Arede, J., Paulo Ferreira, A., Gonzalo-Skok, O., & Leite, N. (2019). Maturational development as a key aspect in physiological performance and national-team selection in elite male basketball players. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 14(7), 902-910. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0681>
- Beunen, G., & Malina, R. M. (1988). Growth and physical performance relative to the timing of the adolescent spurt. *Exercise & Sport Sciences Review*, 16, 503-540.
- Beunen, G., & Malina, R. M. (1996). Growth and biological maturation: relevance to athletic performance. In O. Bar-Or (Ed.), *The child & adolescent athlete* (Vol. 6, pp. 3-24). Blackwell.
- Beunen, G. P., Rogol, A. D., & Malina, R. M. (2006). Indicators of biological maturation and secular changes in biological maturation. *Food & Nutrition Bulletin*, 27(4 Suppl Growth Standard), S244-256. <https://doi.org/10.1177/156482650602745508>
- Biro, F. M., Pinney, S. M., Huang, B., Baker, E. R., Walt Chandler, D., & Dorn, L. D. (2014). Hormone changes in peripubertal girls. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 99(10), 3829-3835. <https://doi.org/10.1210/jc.2013-4528>
- Carling, C., Le Gall, F., & Malina, R. M. (2012). Body size, skeletal maturity, and functional characteristics of elite academy soccer players on entry between 1992 and 2003. *Journal of Sports Sciences*, 30(15), 1683-1693. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.637950>
- Carvalho, H. M., Lekue, J. A., Gil, S. M., & Bidaurragaga-Letona, I. (2017). Pubertal development of body size and soccer-specific functional capacities in adolescent players. *Research in Sports & Medicine*, 25(4), 421-436. <https://doi.org/10.1080/15438627.2017.1365301>
- De Donno, A., Angrisani, C., Mele, F., Introna, F., & Santoro, V. (2021). Dental age estimation: Demirjian's versus the other methods in different populations. A literature review. *Medicine, Science & the Law*, 61(1), 125-129. <https://doi.org/10.1177/0025802420934253>
- Demirjian, A., & Goldstein, H. (1976). New systems for dental maturity based on seven and four teeth. *Annals of Human Biology*, 3(5), 411-421. <https://doi.org/10.1080/03014467600001671>
- Demirjian, A., Goldstein, H., & Tanner, J. M. (1973). A new system of dental age assessment. *Human Biology*, 45(2), 211-227.
- Drenowatz, C., Eisenmann, J. C., Pfeiffer, K. A., Wickel, E. E., Gentile, D., & Walsh, D. (2010). Maturity-related differences in physical activity among 10- to 12-year-old girls. *American Journal of Human Biology*, 22(1), 18-22. <https://doi.org/10.1002/ajhb.20905>
- Drenowatz, C., Wartha, O., Klenk, J., Brandstetter, S., Wabitsch, M., & Steinacker, J. (2013). Differences in health behavior, physical fitness, and cardiovascular risk in early, average, and late mature children. *Pediatric Exercise Science*, 25(1), 69-83. <https://doi.org/10.1123/pes.25.1.69>
- Dugdale, J. H., McRobert, A. P., & Unnithan, V. B. (2021). Selected, deselected, and reselected: a case study analysis of attributes associated with player reselection following closure of a youth soccer academy. *Frontiers in Sports & Active Living*, 3, 633124. <https://doi.org/10.3389/fspor.2021.633124>
- Dugdale, J. H., Sanders, D., Myers, T., Williams, A. M., & Hunter, A. M. (2021). Progression from youth to professional soccer: A longitudinal study of successful and unsuccessful academy graduates. *Scandinavian Journal of Medicine Sciences & Sports*, 31 Suppl 1, 73-84. <https://doi.org/10.1111/sms.13701>
- Figueiredo, A. J., Gonçalves, C. E., Coelho E Silva, 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. <https://doi.org/10.1080/03014460802570584>
- Garnett, S. P., Högl, W., Blades, B., Baur, L. A., Peat, J., Lee, J., & Cowell, C. T. (2004). Relation between hormones and body composition, including bone, in prepubertal children. *American Journal of Clinical Nutrition*, 80(4), 966-972. <https://doi.org/10.1093/ajcn/80.4.966>

- Gouvea, M., Cyrino, E. S., Ribeiro, A. S., da Silva, D. R. P., Ohara, D., Valente-dos-Santos, J., Coelho-E-Silva, M. J., & Ronque, E. (2016). Influence of skeletal maturity on size, function and sport-specific technical skills in youth soccer players. *International Journal of Sports Medicine*, 37(6), 464-469. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1569370>
- Greulich, W., & Pyle, S. J. (1959). *Radiographic atlas of skeletal development of the hand wrist*. (2^o ed.). Stanford University Press.
- Guimaraes, E., Baxter-Jones, A., Maia, J., Fonseca, P., Santos, A., Santos, E., Tavares, F., & Janeira, M. A. (2019). The roles of growth, maturation, physical fitness, and technical skills on selection for a portuguese under-14 years basketball team. *Sports*, 7(3), 61. <https://doi.org/10.3390/sports7030061>
- Guimarães, E., Ramos, A., Janeira, M. A., Baxter-Jones, A. D. G., & Maia, J. (2019). How does biological maturation and training experience impact the physical and technical performance of 11-14-year-old male basketball players? *Sports*, 7(12), 243. <https://doi.org/10.3390/sports7120243>
- Gutiérrez-Díaz del Campo, D. (2013). Revisión y propuestas de intervención sobre el Efecto de la Edad Relativa en los ámbitos educativo y deportivo. *Retos. Nuevas Tendencias en Educación Física, Deporte y Recreación*, 1(23), 51-63.
- Gómez-Campos, R., de Arruda, M., Hobold, E., Abella, C. P., Camargo, C., Martínez-Salazar, C., & Cossio-Bolaños, M. A. (2013). Valoración de la maduración biológica: usos y aplicaciones en el ámbito escolar. *Revista Andaluza de Medicina del Deporte*, 6(4).
- Hammami, R., Sekulic, D., Selmi, M. A., Fadhloun, M., Spasic, M., Uljevic, O., & Chaouachi, A. (2018). Maturity status as a determinant of the relationships between conditioning qualities and preplanned agility in young handball athletes. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 32(8), 2302-2313.
- Handelsman, D. J., Hirschberg, A. L., & Bermon, S. (2018). Circulating testosterone as the hormonal basis of sex differences in athletic performance. *Endocr Rev*, 39(5), 803-829. <https://doi.org/10.1210/er.2018-00020>
- Johnston, K., Wattie, N., Schorer, J., & Baker, J. (2018). Talent identification in sport: a systematic review. *Sports Med*, 48(1), 97-109. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0803-2>
- Kelch, R. P., & Beitins, I. Z. (1994). Adolescent sexual development. In M. S. Kappy, R. M. Blizzard, & C. J. Migeon (Eds.), *The diagnosis and treatment of endocrine disorders in childhood and adolescence* (pp. 193-234). Charles Thomas.
- 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 & Conditioning Research*, 28(5), 1454-1464. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000391>
- Malina, R.M. (2011). Skeletal age and age verification in youth sport. *Sports Medicine*, 41(11), 925-947.
- Malina, R. M., & Bouchard, C. (1991). *Growth, maturation, and physical activity*. Human Kinetics Books, Champaign, IL, Estados Unidos.
- Malina, R. M., Choh, A. C., Czerwinski, S. A., & Chumlea, W. C. (2016). Validation of maturity offset in the fels longitudinal study. *Pediatric Exercise Sciences*, 28(3), 439-455. <https://doi.org/10.1123/pes.2015-0090>
- Malina, R. M., Coelho-E-Silva, M. J., Martinho, D. V., Sousa-E-Siva, P., Figueiredo, A. J., Cumming, S. P., Králík, M., & Kozieł, S. M. (2021). Observed and predicted ages at peak height velocity in soccer players. *PLoS One*, 16(7), e0254659. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254659>
- Malina, R. M., Martinho, D. V., Valente-Dos-Santos, J., Coelho-E-Silva, M. J., & Kozieł, S. M. (2021). Growth and maturity status of female soccer players: a narrative review. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 18(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph18041448>
- 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. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-094623>
- Marshall, W. A., & Tanner, J. M. (1968). Growth and physiological development during adolescence. *Annual Review in Medicine*, 19, 283-300. <https://doi.org/10.1146/annurev.me.19.020168.001435>
- Marshall, W. A., & Tanner, J. M. (1969). Variations in pattern of pubertal changes in girls. *Archives of Disease in Childhood*, 44(235), 291-303. <https://doi.org/10.1136/adc.44.235.291>
- Marshall, W. A., & Tanner, J. M. (1970). Variations in the pattern of pubertal changes in boys. *Archives of Disease in Childhood*, 45(239), 13-23. <https://doi.org/10.1136/adc.45.239.13>
- Matta, M. d. O., Figueiredo, A. J. B., Garcia, E. S., & Seabra, A. F. T. (2014). Morphological, maturational, functional and technical profile of young Brazilian soccer players [Perfil morfológico, maturacional, funcional e técnico de jovens futebolistas Brasileiro]. *Revista Brasileira de Cineantropometria & Desempenho Humano*, 16(3), 277-286. <https://doi.org/10.5007/1980-0037.2014v16n3p277>
- Matthys, S. P., Vaeyens, R., Coelho, E. S. M. J., Lenoir, M., & Philippaerts, R. (2012). The contribution of growth and maturation in the functional capacity and skill performance of male adolescent handball players. *International Journal of Sports Medicine*, 33(7), 543-549. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1298000>
- Mirwald, R. L., Baxter-Jones, A. D., Bailey, D. A., & Beunen, G. P. (2002). An assessment of maturity from anthropometric measurements. *Medicine & Sciences in Sports & Exercise*, 34(4), 689-694.
- Moore, S. A., McKay, H. A., Macdonald, H., Nettlefold, L., Baxter-Jones, A. D., Cameron, N., & Brasher, P. M. (2015). Enhancing a Somatic Maturity Prediction Model. *Medicine & Sciences in Sports & Exercise*, 47(8), 1755-1764. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000588>
- Roche, A. F., Chumlea, W. C., & Thissen, D. (1988). *Assessing the skeletal maturity of the Hand-Wrist: Fels Method*. Charles C Thomas.
- Sherar, L. B., Mirwald, R. L., Baxter-Jones, A. D., & Thomis, M. (2005). Prediction of adult height using maturity-based cumulative height velocity curves. *Journal of Pediatrics*, 147(4), 508-514. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2005.04.041>
- Söğüt, M., Luz, L. G. O., Kaya, Ö. B., Altunsoy, K., Doğan, A. A., Kirazci, S., Clemente, F.M., Nikolaidis, P.T., Rosemann, T., & Knechtle, B. (2019). Age- and maturity-related variations in morphology, body composition, and motor fitness among young female tennis players. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 16(13), 2412. <https://doi.org/10.3390/ijerph16132412>
- Tanner, J., Whitehouse, R., Cameron, N., Marshall, W., Healy, M., & Goldstein, H. (1975). *Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW2 method)*. (2^o ed.). Academic Press.

- Tanner, J. M. (1990). *Fetus into Man: Physical Growth from Conception to Maturity*. Harvard University Press.
- Tanner, J. M., Healy, M. J. H., Goldstein, H., & Cameron, N. (2001). *Assessment of Skeletal Maturity and Prediction of Adult Height (TW3) Method*. Saunders Ltd.
- Thomis, M. A., & Towne, B. (2006). Genetic determinants of prepubertal and pubertal growth and development. *Food & Nutrition Bulletin*, 27(4 Suppl Growth Standard), S257-278. <https://doi.org/10.1177/15648265060274S509>
- Towson, C., Cobley, S., Midgley, A. W., Garrett, A., Parkin, G., & Lovell, R. (2017). Relative age, maturation and physical biases on position allocation in elite-youth soccer. *International Journal of Sports & Medicine*, 38(3), 201-209. <https://doi.org/10.1055/s-0042-119029>
- Towson, 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 Health Sciences*, 10(4), 403-412. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2020.09.003>
- 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(9), 703-714. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838090-00001>
- Valente-Dos-Santos, J., Coelho-E-Silva, M. J., Vaz, V., Figueiredo, A. J., Capranica, L., Sherar, L. B., Elferink-Gemser, M.T., & Malina, R. M. (2014). Maturity-associated variation in change of direction and dribbling speed in early pubertal years and 5-year developmental changes in young soccer players. *Journal of Sports Medicine & Physical Fitness*, 54(3), 307-316.
- Wickel, E. E., & Eisenmann, J. C. (2007). Maturity-related differences in physical activity among 13- to 14-year-old adolescents. *Pediatric Exercise Sciences*, 19(4), 384-392. <https://doi.org/10.1123/pes.19.4.384>