



Revisión

La evaluación de la composición corporal “*in vivo*”; parte I: perspectiva histórica

E.A. Carnero^{1,4}, J.R. Alvero-Cruz², M.A. Giráldez³ y L.B. Sardinha⁴

¹Laboratorio de Biodinámica y Composición Corporal. Facultad de Ciencias de la Educación. Universidad de Málaga. España. ²Escuela de Medicina de la Educación Física y el Deporte. Facultad de Medicina. Universidad de Málaga. España. ³Facultad de Ciencias del Deporte y la Educación Física. Universidad de A Coruña. España. ⁴Laboratorio de Ejercicio y Salud, Facultad de Motricidad Humana, Universidad Técnica de Lisboa. Portugal.

Resumen

El estudio de la composición corporal humana ha cobrado una relevancia creciente en las últimas décadas, debido a sus enormes aplicaciones en los terrenos clínico, deportivo y de la actividad física saludable. Sin embargo, no es un área de conocimiento de reciente creación, y su estudio dentro de la biología data ya de la segunda mitad del siglo XIX. En este documento resumiremos los tres grandes periodos en los que se divide la investigación de la composición corporal humana, dando especial relevancia a los descubrimientos y avances para el estudio *in vivo*. Aunque históricamente podemos situar los primeros descubrimientos en la antigüedad, la primera etapa (temprana) comienza en el 1850, y está caracterizada principalmente por los datos obtenidos de la disección de cadáveres, y la utilización de los primeros métodos bioquímicos para el estudio *in vivo* y la observación de las alteraciones. En la segunda etapa (reciente) está protagonizada por el desarrollo de los primeros modelos matemáticos para estimar componentes corporales y por los grandes desarrollos tecnológicos de la segunda parte del siglo XX. En la tercera etapa (composición corporal en el siglo XXI o contemporánea) los estudios se están centrando en validar los modelos clásicos para poblaciones específicas, conocer los determinantes genéticos de la composición corporal (primero fenotipos y recientemente genotipos) y recuperar el estudio de la composición corporal dinámica.

(*Nutr Hosp.* 2015;31:1957-1967)

DOI:10.3305/nh.2015.31.5.8570

Palabras clave: *Composición corporal. Historia. Modelos y métodos.*

“*IN VIVO*” BODY COMPOSITION ASSESSMENT; PART I: A HISTORIC OVERVIEW

Abstract

The study of body composition (BC) has gained in relevance over the last decades, mainly because of its important health- and disease- related applications within both the clinical and the sports setting. It is not a new area, and its especial relevance as an area of biology dates from the second half of the nineteenth century. In this paper, we have reviewed the three historic periods of BC, with special reference to the most important advances in *in vivo* assessment. Even though the earliest findings about human BC date from antiquity, the first (or ‘early’) stage of discovery began in 1850. Said early stage was mainly characterized by data obtained from the dissection of cadavers and by the application of biochemical methods *in vivo*. Longitudinal changes in body composition were also a concern. The second (so called ‘recent’) stage, in the second half of the twentieth century, was marked by milestones such as the formulation of the first mathematical models for the estimation of body components, and technological advances. Within the third (‘contemporary’ or ‘current’) stage of research, several groups have focused on validating the classical BC models in specific populations, on analysis of the genetic determinants (i.e. phenotypes and, more recently genotypes) of body composition, and on re-instigating the study of dynamic BC.

(*Nutr Hosp.* 2015;31:1957-1967)

DOI:10.3305/nh.2015.31.5.8570

Key words: *Body composition assessment. History. Models and methods.*

Correspondencia: Elvis Alvarez Carnero.
Facultad de Ciencias de la Educación.
Universidad de Málaga.
Boulevard Louis Pasteur S/n. Campus de Teatinos.
29071 Málaga. España.
E-mail: ecarnero@uma.es

Recibido: 26-XII-2014.
Aceptado: 10-II-2015.

Introducción

La evaluación de la composición corporal es un aspecto fundamental de la valoración funcional del cuerpo humano en la salud, en la clínica y en el rendimiento físico. Son diversas las razones empíricas y científicas que avalan las aplicaciones y necesidades de evaluación de los distintos componentes corporales:

- Ofrece la posibilidad de clasificar a una persona dentro de una comunidad, desde el punto de vista de la salud, el desarrollo, su potencialidad para el rendimiento físico e incluso estéticamente^{1,2}.
- Nos permite relativizar e interpretar con mayor precisión y racionalidad determinados acontecimientos o adaptaciones funcionales en un sujeto sometido a un proceso de cambio, bien natural o artificial (p.e., el aumento del consumo máximo de oxígeno después de un periodo de entrenamiento o después de una cirugía de trasplante cardíaco, pueden y deben ser relativizados para la masa corporal total y/o para la activa).
- Actualmente la evaluación de la composición corporal se ha convertido en un componente fundamental en la evaluación de la salud de los humanos, porque sus alteraciones se asocian con diversas condiciones comórbidas, por lo que su conocimiento permite anticipar sus efectos adversos y ayuda en la prevención y el tratamiento de muchos factores de riesgo y patologías, facilitando por otro lado los rastreos epidemiológicos (p.e., las relaciones positivas entre el perímetro de la cintura y los triglicéridos, el colesterol plasmático, la concentración de insulina y la diabetes mellitus tipo II). Estas son posibilidades que, dentro del campo de la salud, ofrecen una ventaja estratégica para el diseño de planes de salud pública desde el punto de vista de la prevención o el tratamiento.

A pesar de las enormes potencialidades de este campo, excepto para Moore³ (pionero de la composición corporal celular), la mayor parte de la historia de la evaluación de la composición corporal hasta los años 80 ha sido dominada por los esfuerzos en medir la grasa corporal y su compartimento recíproco, la masa magra. Actualmente, esto ha cambiado y existen numerosos grupos de investigación y campos de intervención donde otros componentes corporales han cobrado importancia como por ejemplo, la evaluación de la densidad mineral ósea para el diagnóstico y control de la osteoporosis, o el control de la masa libre de grasa en enfermos con síndrome de la inmunodeficiencia adquirida (SIDA).

Aunque otros compartimentos del cuerpo hayan ganado importancia, sin duda el intento de evaluar la masa grasa corporal, y paralelamente evitar su acumulación, continúan teniendo gran importancia en todos

los contextos, pues el exceso de acumulación de grasa, conocido como obesidad, es un problema de salud pública en los países industrializados e incluso en algunos del tercer mundo, además de un problema para determinadas especialidades deportivas (deportes de lucha, gimnasia deportiva, deportes de resistencia o incluso modalidades de equipo)^{4,6}. El problema de la obesidad ya ha sido reconocido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como la nueva epidemia del siglo XXI⁷, pues su prevalencia está en aumento, y ya se sabe que más del 50% de los adultos de los principales países industrializados sufren al menos sobrepeso (índice de masa corporal $> 25 \text{ kg.m}^{-2}$), llegando en algunos la prevalencia al 70%⁸. Si observamos sectores más jóvenes de la población (niños y adolescentes, aquellos que aún están en proceso de formación básica) el panorama no es mucho más alentador, pues la obesidad franca se ha duplicado desde inicios de los años 60^{9,10}. Resumiendo, en los últimos datos de la OMS se puede descubrir que existen en el mundo más de 250.000.000 de obesos ($\text{IMC} \geq 30 \text{ Kg.m}^{-2}$) lo cual representa aproximadamente el 7% de la población; y al menos 500.000.000 millones tienen sobrepeso¹¹. Ante este panorama, se hace trascendental activar los mecanismos de intervención para contrarrestar esta situación, entre los que la actividad física es un mecanismo primario para la prevención y el tratamiento del problema. Entre las herramientas necesarias para efectuar un trabajo de calidad en la evaluación, la intervención y el control del proceso, la evaluación de la composición corporal se hace fundamental, pues los objetivos de adaptación tienen un componente estructural y morfológico global y otros regionales: no basta cambiar la cuantía de un componente, sino también su distribución corporal.

Los métodos para la evaluación de la composición corporal, y concretamente de la masa grasa, son numerosos y de diversa complejidad en función del nivel de análisis, métodos o número de compartimentos estimados o cuantificados. En este trabajo se abordarán todos los métodos y niveles posibles para evaluar la composición corporal y con más profundidad aquellos destinados al compartimento que respecta a la grasa corporal, el cual se utilizará como paradigma de estudio para entender la evaluación de otros que también pueden ser importantes para la salud o para el rendimiento físico. En la primera parte se realizará una pequeña revisión histórica de la evolución de la ciencia y la tecnología aplicada al estudio de la composición corporal. En el segundo punto se resumirá la organización jerárquica de niveles y componentes para el estudio de la composición corporal. Finalmente, se compilarán las metodologías mejor validadas, más útiles, y precisas para estimar el compartimento grasa en situaciones de laboratorio o bien de campo. Adicionalmente, estas metodologías pueden ser utilizadas para estimar otros componentes, o para construir modelos matemáticos que permitan estimar con mayor precisión otras entidades corporales.

Objetivos

- Resumir desde una perspectiva histórica las épocas y acontecimientos científicos más relevantes del estudio de la composición corporal humana como ciencia, en el mundo y en España.
- Introducir un segundo artículo que revisara la organización sistemática del estudio de la composición corporal.

Métodos

Esta es una revisión del tipo resumen/perspectiva histórica¹²; en ella hemos seleccionado los principales artículos y textos históricos que han resumido los avances metodológicos, tecnológicos y fisiológicos más relevantes relacionados con el estudio de la composición corporal *in vivo*. Las búsquedas de los textos se han realizado a partir de bases de datos: PubMed, EBSCO e ISI Web of Knowledge; Librería del Congreso (Library of Congress, Washington D.C. USA). Por otro lado, al tratarse de un área de conocimiento relativamente joven, hemos podido consultar diversas dudas con algunos de los científicos (Robert Malina, Timothy Lohman, Dale Schoeller, Steven Heymsfield, Jose Antonio López Calbet) que han desarrollado o contribuido al desarrollo de pequeños nichos de conocimiento del área de la composición corporal. De este modo pudimos completar algunas lagunas que no aparecen descritas en la literatura científica de forma clara, pero que sin duda ayudaron a dibujar una mejor perspectiva de la evolución histórica de esta área de conocimiento.

El texto está presentado de forma cronológica, aunque en la medida de lo posible se han intentado agrupar acontecimientos de contenidos próximos.

Evolución histórica del Estudio de la Composición Corporal

Desde la antigüedad ya se conjeturaba con la composición del cuerpo. Los primeros conceptos conocidos sobre composición corporal datan de 400 años a.C., en Grecia. Los helenos transformaron su pensamiento y superaron el origen mitológico de los entes vivos y de las manifestaciones físicas del mundo y comenzaron a asumir que el cuerpo humano y los seres vivos estaban formados por los cuatro elementos fundamentales del cosmos (fuego, tierra, aire y agua)¹³. El propio Hipócrates creía que el cuerpo estaba formado por cuatro constituyentes: sangre, linfa, bilis negra y bilis amarilla. Desde esta concepción, Galeno mantiene la idea de equilibrio u homeostasis, reinventada siglos más tarde por Claude Bernard, y acuñada científicamente por Walter Canon en 1939¹³. Aunque la propuesta de Canon pudiese parecer desconectada del concepto de composición corporal, es por el contrario aquello que

da sentido al estudio de sus constituyentes pues de las proporciones de estos depende el funcionamiento de los sistemas. Sirva apenas como ejemplo, el impacto que tiene la depleción del glucógeno en el rendimiento humano¹⁴, o la disminución excesiva de la masa grasa en la función reproductiva femenina¹⁵.

A pesar de tan temprano inicio, sorprende que el estudio de la composición corporal se constituyese como rama de la ciencia moderna hace tan solo 150 años. Según Zi Mian Wang, en su revisión histórica del 1997¹⁶ este periodo puede dividirse grosso modo, en dos etapas las cuales se describen a continuación:

La etapa temprana del estudio de la composición corporal humana (desde 1850 hasta 1950)

En esta etapa surgen los primeros estudios relacionados con la composición corporal en humanos, que fueron posibles gracias al avance de otras áreas de conocimiento como la química, la anatomía o la nutrición. El químico alemán Justus von Liebig (1803-1873), con sus estudios basados en análisis químicos, fue el primero en encontrar determinadas sustancias en los alimentos que formaban parte del cuerpo; también postuló que los fluidos corporales contenían más sodio y menos potasio que los tejidos. Es también en el primer tercio del siglo XIX cuando sociólogo y estadístico Belga Lambert-Adolphe-Jacques Quetelet escribe su obra original “*Sur l’homme et le développement de ses facultés, essai d’une physique sociale*” en la cual, entre otros conceptos relacionados con la morfología del cuerpo, describe por primera vez el que es con toda seguridad el componente más citado y utilizado en la literatura científica de la composición corporal y la morfología de superficie, el Índice de Masa Corporal o IMC¹⁷. En el siglo XX una de las primeras publicaciones específicas de la composición corporal es la de Mendel y Judson, en la que describieron brevemente relaciones entre el crecimiento, la nutrición y la composición corporal¹⁸. De esta forma queda marcado el inicio del estudio temprano de la composición corporal, el cual a su vez puede ser separado en tres áreas de investigación:

Información cuantitativa con Estudios de Cadáveres: Ante la imposibilidad de estudiar la composición corporal humana *in vivo*, los primeros trabajos fueron realizados a partir de la disección de cadáveres, a pesar de las duras restricciones que existían en países como Estados Unidos, donde hace poco más de 160 años no era posible donar el cuerpo a la ciencia. Sin embargo, después de instaurarse los procesos legales para la obtención/donación de cadáveres para el estudio de la anatomía, empezó a ser posible su utilización para el análisis cuantitativo de sus componentes¹⁹. Así, en 1843 Schwann cuantificó las características de los órganos de numerosos cadáveres²⁰, y veinte años más tarde Bischoff (1863) analizó el contenido de agua de varios cadáveres humanos. Posteriormente, en 1877,

Fehling evaluó el contenido de agua total de fetos y recién nacidos. Entrando en siglo xx, Camerer y Söldner estimaron la composición química de fetos y recién nacidos analizando su contenido en agua, grasa, nitrógeno y los principales minerales; finalmente, ya en 1938, Iob y Swanson realizaron evaluaciones de un cuerpo completo incluyendo minerales traza para fetos y recién nacidos²¹. Merecen también relevancia los trabajos de Mildred Trotter quien realizó los primeros estudios con esqueletos completos, y definió su peso, su contenido mineral deshidratado (termino anglosajón conocido como "ash") y variación étnica²².

Como se puede deducir, los estudios de disección humana han tenido una importancia trascendental para el estudio de los componentes fundamentales del cuerpo humano y de sus relaciones macroscópicas. Su validez sigue vigente ya que la variabilidad interindividual y sus condicionantes no están todavía completamente establecidos al necesitar estudios con muestras numerosas y heterogéneas. El conjunto más grande de disección de cadáveres fue el del estudio de Bruselas²⁰, que incluyó los cuerpos de 12 hombres y 13 mujeres y proporcionó gran cantidad de datos. Los análisis consistieron en tomar medidas antropométricas de los cadáveres y su posterior disección por tejidos (piel, tejido graso subcutáneo, músculos, huesos y vísceras), determinando el peso de cada uno de los componentes químicos y calculando su densidad individual. Como se describirá después, el conocimiento directo de la densidad de los tejidos, es uno de los paradigmas más importantes en el desarrollo de modelos matemáticos para estimar la composición corporal a partir de medidas físicas del cuerpo, como el volumen, los pliegues subcutáneos o la atenuación de fotones después de atravesar los tejidos; por ello, solamente conociendo de forma directa las densidades de los tejidos, se podrán estimar posteriormente de forma indirecta *in vivo*.

El análisis de cadáveres es la única técnica que posibilita la evaluación de la composición corporal en todos sus niveles y, además, sienta las bases para la validación de la composición corporal *in vivo*; sin embargo, aspectos como la temperatura corporal, la deshidratación y otros factores asociados a la conservación del cuerpo *post mortem*, deben limitar la extrapolación de todos sus datos al 100% a muestras *in vivo*²⁰.

Métodos *in vivo* para la estimación de varios componentes corporales: Los paradigmas para la estimación/medición de la composición corporal *in vivo* son sin duda antiguos, aunque las limitaciones tecnológicas no posibilitaron la medición de componentes internos hasta el inicio del siglo xx. La medición de residuos moleculares constituyentes de los tejidos en la orina fue una de las primeras aproximaciones. Parece ser que fue Folin en 1905, el primero en hipotetizar que la creatinina podía ser utilizada para estimar una parte de la composición corporal. Sin embargo, no fue hasta 1909 cuando Shaffer y Coleman utilizaron por primera vez la eliminación de creatinina en la orina de

24 horas como un indicador de la masa muscular esquelética, convirtiéndose, probablemente, en el primer componente corporal, de un nivel distinto del cuerpo entero, estimado *in vivo* (ver siguiente sección)¹³. En este periodo temprano, también fueron medidos los fluidos corporales y algunos componentes relevantes a partir del todavía hoy utilizado, principio de dilución²³. Por ejemplo, utilizando métodos de tinción, Keith y sus alumnos estimaron en 1915 el volumen de sangre usando como marcadores el Rojo Vital y el Rojo Congo.

El principio de Arquímedes (287-212 a.C.) también ha contribuido para el avance del estudio de la composición corporal, siendo aplicado en 1942 por Behnke para estimar las proporciones relativas de grasa y masa libre de grasa en humanos²⁴. Keys y Brozek en 1953 desarrollaron este método hidrodensitométrico de forma más detallada que, con pequeñas variaciones, continua aplicándose todavía²⁵. Así, el principio de Arquímedes proporciona un medio para estimar el porcentaje de masa grasa, y hasta hace bien poco el método densitométrico por pesada subacuática (hidrostática), el cual se deriva del mismo principio, era considerado un "*gold standard*" (método de referencia) para la evaluación y validación de métodos de campo para estimar la masa grasa²⁶.

Otro de los grandes hitos de este periodo, fue el descubrimiento de los isótopos por Soddy en 1911, que posibilitó la estimación del potasio corporal total, siendo el primer elemento medido *in vivo* en el cuerpo humano. Las aplicaciones con isótopos comenzaron a sucederse de forma profusa, y en 1934 von Hevesy y Hofer publicaron por primera vez el protocolo para la utilización del óxido de deuterio ($^2\text{H}_2\text{O}$) como medio para estimar el volumen de agua corporal total. Posteriormente en 1946 Moore midió el intercambio sodio/potasio, iones que están distribuidos principalmente en los fluidos corporales, y por tanto, pueden ser derivados también por el principio de dilución²⁷. También a partir de las investigaciones isotópicas Sievert en 1951 demostró que la cantidad de ^{40}K (isótopo radioactivo del potasio) en el cuerpo humano era suficientemente grande como para ser detectada y cuantificada por técnicas radioactivas, lo que posibilitará la estimación del potasio corporal total sin cualquier marcador a partir de las emisiones radiactivas de cualquier persona. La continuación de estos estudios por parte de Forbes derivó, en 1961, en el método para estimar la masa libre de grasa (MLG) y la propia grasa desde la cantidad de potasio corporal total (el potasio guarda una relación relativamente constante con la cantidad de MLG), utilizando para ello el análisis de la radiación gamma del ^{40}K ²⁸. Por su parte, Fischer utilizó otro isótopo radioactivo el ^{42}K , para cuantificar la permeabilidad de los tejidos magros para este elemento²⁹; este avance sirvió a un colega de su equipo, Francis Moore, para cuantificar el intercambio de potasio y, sentar así las bases para la cuantificación de la masa celular corporal³. Finalmente, ya en esta época se sentaron las bases

para la estimación del peso del esqueleto in vivo³⁰, y de su densidad a partir de los trabajos de Paul Baker con rayos-X en 1958³¹.

Alteraciones en la composición corporal. La edad fue probablemente el primer factor estudiado en relación con la composición corporal, así en 1857 Aubert von Bezold encontró que el crecimiento de los animales estaba acompañado por un incremento en la proporción de residuos secos³², y con ello, una disminución concomitante del contenido de agua³³. En 1914, Benjamin descubrió que los niños acumulaban nitrógeno durante el crecimiento; basado en este hallazgo, Moulton en 1923, propuso el concepto de “madurez química” para definir el momento en el cual la composición química del niño se aproxima a la del adulto, principalmente en lo que respecta a la estabilidad química de los componentes de la masa libre de grasa³⁴. La *nutrición* fue otro factor ampliamente estudiado durante esta fase temprana de investigación. Trabajos como el de Cathcart en 1907, o el de Benedict en 1919 encontraron relaciones directamente proporcionales entre la cantidad de nitrógeno corporal y la cantidad de comida ingerida por una persona. Más tarde fueron estudiados otros factores, que influían sobre la composición corporal como el *ejercicio, la raza, el género, o diversas enfermedades*. Entre estas últimas sin duda los estudios más relevantes fueron aquellos relacionados con la distribución regional de la composición corporal, siendo el referente histórico el médico francés Jean Vague, quien entre 1940-1950 observó la mayor probabilidad de complicaciones metabólicas y cardiovasculares entre las personas con una distribución androide de la grasa. En esta misma línea Earl Reynolds, del Instituto de investigación Fels, describió por primera vez en los años 50 la distribución de la adiposidad para niños y adolescentes.

Otros conceptos importantes acuñados en esta época

Además de los avances relatados en los tres apartados precedentes, otros acontecimientos y hallazgos relacionados con la composición corporal surgieron en esta época. Así en 1959, Moleschott fue el primero en informar sobre las cantidades de proteína, grasa, sales y agua en partes por mil en el cuerpo humano. En el mismo año J.B. Lawes y J.H. Gilbert observaron que el contenido de agua de los animales mantenía una relación de proporcionalidad inversa, del mismo modo que se conoce actualmente para los humanos. En 1835 Quetelet observó que el peso incrementaba en una proporción cuadrática con la estatura y estableció el índice de Quetelet, el cual hoy en día conocemos como índice de masa corporal gracias a Ancel Keys. En 1896, J. Katz describió el análisis químico detallado del músculo. El concepto de “masa protoplasmática activa” fue acuñado por Voit en 1901 y Rubner en 1902, el propio Rubner es uno de los autores que en esta época comenzó a relacionar conceptos energé-

ticos con variables de composición corporal. Fue en 1906, cuando Magnus-Levy habló por primera vez del concepto de “masa corporal libre de grasa” (MLG), importantísimo para las generaciones futuras de investigadores y profesionales de la composición corporal. En 1916, Du Bois y Du Bois propuso la ecuación para estimar el área de superficie corporal, concepto fundamental para determinadas aplicaciones terapéuticas relacionadas con la nutrición y la farmacología, además de ser importantes para relativizar determinadas variables fisiológicas. Utilizando la misma línea antropométrica, el checo Jindrých Matiegka en el año 1921 desarrolló el primer modelo para estimar la masa muscular esquelética total. En 1923, Moulton y Marriott propusieron los conceptos de “maduración química de la composición corporal” y “anhidremia”. A pesar de existir muchos más descubrimientos en esta época prematura de la composición corporal, finalizamos la revisión de esta etapa referenciando el trabajo de Fidanza, Keys y Anderson en 1953, quienes informaron de la uniformidad de la densidad de la masa grasa humana entre individuos³⁵, hallazgo definitivo para estimar compartimentos de la composición con métodos densiométricos de dos componentes (masa grasa + MLG), que ganaron gran relevancia al final de esta época y muchos de ellos siguen siendo válidos y utilizados hoy en día. En este periodo se desarrollaron tres modelos de dos componentes: Behnke 1942, Siri 1956, y el de Brozek a partir de la dirección del propio Keys ya en 1963.

El fin de esta época temprana de investigación lo marca la celebración del Primer Simposio de Composición Corporal de la Sociedad para el Estudio de la Biología Humana, organizado por la Academia de Ciencias de Nueva York en 1963. A partir de aquí surge una nueva etapa de rápidos avances en la investigación de la composición corporal.

Etapa Reciente del Estudio de la Composición Corporal (desde 1960 hasta 1997)

Sin duda esta etapa ha sido de suma importancia para el avance del estudio de la composición corporal, y para que este adquiriese un estatus diferenciado en el ámbito de la biología humana. La denominación de “reciente”, propuesta por Wang y colaboradores, ha quedado obviamente obsoleta, pero decidimos seguir utilizándola para respetar la designación original de los autores. El progreso ha ido ligado a la evolución de la tecnología desarrollada en otros campos o específicamente para el estudio de la composición corporal. Así los avanzadísimos métodos de análisis de activación de neutrones y las nuevas técnicas de imagen (como la tomografía axial computerizada, la resonancia magnética o los ultrasonidos) han dado una nueva perspectiva al estudio de la composición corporal, mejorando algunos de sus postulados iniciales y ganando en validez, fiabilidad y precisión.

Desde un punto de vista específico de la composición corporal, el primer acontecimiento científico de esta época fue el desarrollo y validación del modelo de tres compartimentos para estimar la masa grasa desarrollado por William Siri en 1961³⁶. Un año después Thomasset fue el primero en introducir la bioimpedancia³⁷. En el 1963, Sorenson y Cameron desarrollaron las bases teóricas de la densitometría radiológica para el análisis de tejidos. Pocos años después, en el congreso anual de la Asociación Americana de Antropólogos Físicos de 1968 en Detroit, Richard Mazess presentó el primer trabajo de estimación del hueso y peso del esqueleto por absorciometría fotónica, directa y cuatro años más tarde desarrollaría el primer densitómetro óseo comercial. En esta época, Anderson y colaboradores (1964) junto Cohn y Dombrowski (1971) sentaron las bases para la aplicación del método de activación de neutrones *in vivo* para la composición corporal, el cual representa el método de referencia para la evaluación *in vivo* de numerosas entidades elementales y moleculares^{38,39}; por ejemplo, elementos como el calcio o el sodio corporal total, o incluso la cantidad de grasa son derivados a partir de este método. En 1973, el ingeniero inglés Godfrey Hounsfield, presentó el primer sistema de imágenes de tomografía computerizada (TAC o TC), que permitiría por primera vez observar al completo el interior del cuerpo humano. La importancia de este equipo fue tal que le valió el premio nobel de medicina y fisiología. Además, su nombre será recordado para siempre en el campo de la composición corporal, pues las unidades de densidad radiológica utilizadas para diferenciar/convertir volúmenes de imágenes de la TAC en masa, llevan su nombre. La TAC fue utilizada por primera vez para el estudio de la composición corporal por Heymsfield, Olafson, Kutner y Nixon⁴⁰.

En la década de los 80 los avances en composición corporal comenzaron a desarrollarse de forma definitiva surgieron importantísimos estudios como el de los cadáveres de Bruselas. La introducción y validación de la resonancia magnética (RM) para el estudio de la composición corporal también ocurrió en esta época⁴¹. Por su parte Richard Mazess continuaba con su inquietud tecnológica y en 1980 funda junto con sus compañeros de la Universidad de Wisconsin (Madison USA) Lunar Corporation, para poder distribuir el primer equipo desarrollado. Posteriormente, en 1988 surgiría el desarrollo definitivo del primer densitómetro radiológico comercial de doble energía (DXA, dual X-ray absorptiometry) para evaluar la composición corporal del cuerpo entero⁴², que ha sido, sin duda, una de las metodologías que más han contribuido para la evolución del estudio de la composición corporal durante la última década.

Al finalizar esta época ya existía un volumen aceptable de datos de composición corporal *post mortem* e *in vivo*. Así, en 1975, Snyder y colaboradores resumieron toda la información sobre composición corporal para crear el "hombre de referencia"⁴³, un concep-

to reintroducido por Brozek en 1952, después de que Quetelet lo propusiera por primera vez en 1935¹⁷. Los primeros estudios sobre velocidad de crecimiento publicados por Alex Roche en 1973, sentarían las bases para que el grupo de Samuel Fomon en la década de los 80 propusieron "el niño de referencia", desde el nacimiento hasta los 10 años³⁴, ambos autores han sido sin duda de gran importancia en el campo de la nutrición pediátrica.

A partir de 1986, se comenzó a celebrar de forma regular el *Simposium* Internacional en Estudios de Composición Corporal *in Vivo*. La primera edición se celebró en Nueva York y la última en Lisboa en 2014, organizada por el Health and Exercise Laboratory de la Universidad Lisboa.

Finalmente, la parte más contemporánea de esta etapa, estuvo caracterizada por un creciente aumento del interés que mostraron áreas como la nutrición, el ejercicio o la medicina clínica, por las importantísimas implicaciones prácticas de la composición corporal. Gran parte de los esfuerzos científicos fueron dirigidos a crear nuevos métodos o tecnologías para evaluar los componentes estructurales del cuerpo humano, y/o en validar o ampliar la validez de los métodos ya existentes para aplicarlos a situaciones de campo (estudios epidemiológicos, situaciones clínicas o subclínicas, control de adaptaciones biológicas con el entrenamiento, o evaluaciones de las dosis y las respuestas en programas de ejercicio para la salud, etc.). Esto provocó que la literatura mundial experimentase una gran expansión, que continúa hoy en día (Tabla I). En las últimas décadas la cantidad anual de artículos científicos con impacto ha pasado de unos centenares a miles. Al mismo tiempo que crecía su número, en las décadas de los 80 y los 90 aumentó también el número de trabajos bien controlados, con mayor validez y el uso de técnicas económicas y fáciles de aplicar, como es el caso de la impedancia bioeléctrica (Tabla I). Estos estudios internacionales, vinieron a complementar las primeras ecuaciones para adultos y niños validadas en poblaciones de los Estados Unidos^{51,52} y del Reino Unido^{53,54}, siendo las más conocidas las de los americanos Andrew Jackson y Michael Pollock, o las de los escoceses John Durnin y John Womersley.

Uno de los últimos avances tecnológicos de esta época fue la invención y divulgación en el año 1995 del pletismógrafo por desplazamiento de aire para medir la densidad corporal total, conocido popularmente como BOD POD⁵⁵. Este equipo facilitó la aplicación del método densiométrico, creado por Behnke²⁴, para estimar la adiposidad corporal total, que hasta ese momento solamente era posible con la metodología de la pesada hidrostática (ver Parte II). Fue también a finales de la década de los 90, cuando comenzó a aplicarse la técnica de ultrasonidos o ecográfica para evaluar la adiposidad visceral, siendo pioneros los estudios de los grupos italiano^{56,57} y japonés⁵⁸. Sin embargo, a pesar de ser una técnica relativamente simple, poco costosa y muy aplicable en el terreno, no fue muy utilizada en

Tabla I
*Volumen de publicaciones científicas con impacto internacional durante el siglo XX y XXI,
dentro del ámbito de la composición corporal y su metodología*

<i>Década</i>	<i>Publicaciones¹</i>	<i>Δ década</i>	<i>Publicaciones²</i>	<i>Δ década</i>
1900-1909	1	-	-	-
1910-1919	1	-	-	-
1920-1929	2	1	-	-
1930-1939	4	2	-	-
1940-1949	14	10	-	-
1950-1959	139	136	-	-
1960-1969	368	229	-	-
1970-1979	522	154	543	-
1980-1989	762	240	549	15
1990-1999	1.671	909	556	16
2000-2009	2.943	1.272	575	11
2010-2014	2.214	-	41	-

¹tema central de la publicación composición corporal; ²tema central de la publicación validación de la composición corporal. Δ, incremento de publicaciones por década. Nota: en esta tabla solamente son incluidas publicaciones con índice impacto internacional (indexadas), y el criterio mínimo para ser incluidas fue que el título de la publicación incluyera el concepto composición corporal (como palabra compuesta), validez, y/o validación, masa grasa y/o masa libre de grasa.

los estudios durante la primera década del siglo XXI; aunque hoy en día, parece retomarse^{59,60}.

Para concluir esta etapa, es importante referenciar a algunos de los científicos más importantes del área de la composición corporal durante las décadas de los 80 y 90, pues sin duda, son responsables por el estado fértil en el que se encuentra esta área de estudio en la actualidad. En los Estados Unidos existen numerosos grupos que han desarrollado una gran labor, sin embargo, aquellos más destacados por número de publicaciones y repercusión de sus estudios son: a) el grupo del Hospital St Luke's-Roosevelt de Nueva York, que en esta época estaba liderado por Steven Heymsfield, responsable de gran parte de la sistematización moderna del estudio de la composición corporal, además de ser uno de los pocos grupos mundiales que utilizó el análisis de activación de neutrones para cuantificar elementos corporales; b) el grupo de Kenneth Ellis, del Baylor College of Medicine de Atlanta, responsable de numerosos estudios de validación de la DXA y artículos metodológicos publicados en la década de los 90; c) el equipo de Dale Schoeller, desde la Universidad de Wisconsin, que aplicó por primera vez en 1982 la técnica del agua doblemente marcada en humanos para estimar el agua corporal total y el gasto energético, convirtiéndose en uno de los especialistas mundiales en técnicas de dilución de isótopos estables para la evaluación de la composición corporal y el metabolismo energético; d) el grupo de la Universidad de Arizona liderado por Timothy Lohman, que desarrolló una intensa actividad en la evaluación de la composición corporal de niños,

adolescentes y deportistas, creó valores de referencia para adolescentes; validar metodologías de terreno y evaluó las alteraciones como consecuencia del ejercicio y la nutrición; e) Robert Malina, profesor emérito del College of Education de la Universidad de Texas en Austin, es probablemente uno de los autores mundialmente más citados en el campo de la morfología, el crecimiento y la actividad física; durante esta época estudió el desarrollo normal de niños y adolescentes, y sus interacciones con la maduración y el rendimiento físico, además de sus condicionantes genéticos; f) en Europa los exponentes principales fueron Paul Deurenberg, del departamento de Epidemiología y Nutrición Humana en la Wageningen Agricultural University en Holanda, que trabajó en estrecha colaboración con Antonio de Lorenzo, del Departamento de Fisiología de la Universidad de Tor Vergata de Roma; ambos han desarrollado un gran trabajo en el estudio del agua corporal y su distribución⁶¹, además de estudiar en profundidad la tecnología y la metodología de los análisis con impedancia bioeléctrica⁶². Estas son apenas algunas de las referencias mundiales más representativas de esta época, cuyos grupos continúan trabajando en la actualidad en diferentes temas de interés. Es justo referir que no ha sido estos los únicos grupos mundiales de la época, otros que han conducido proyectos más específicos con impacto en la composición corporal también han contribuido de forma significativa: por ejemplo, el grupo de David Kelley, del Departamento de Endocrinología y Metabolismo de la Universidad de Pittsburgh, y sus estudios de la asociación de la composición corpo-

ral regional y la resistencia a la insulina, en estrecha colaboración con el grupo liderado por Robert Ross (Queen's University, Canada), que ha contribuido en el desarrollo de la cuantificación de la composición corporal con TAC y MRI.

Etapa Contemporánea. La Composición Corporal en el siglo XXI y en el futuro

A pesar de que los avances tecnológicos siempre estarán en la vanguardia de la evolución de cualquier conocimiento, sin duda el presente y el futuro de la composición corporal pasan por el estudio de sus condicionantes genéticos. Los estudios de genética epidemiológica de la herencia, con gemelos, de adopción y con otras metodologías no invasivas, como el estudio de determinados desordenes Mendelianos⁶³, han servido para dar los primeros pasos durante todo el siglo XX y para mostrarnos los principales fenotipos de la composición corporal⁶⁴, además de su variabilidad condicionada genéticamente. Así, por ejemplo, se había asumido que existía una herencia aproximada del 35% para el IMC, independientemente del género y la edad, a pesar de que el efecto genotípico fuese solo de un 15%⁶⁵. Con la llegada de las nuevas tecnologías y los avances de la biología molecular, se han conseguido diferenciar algunos de los principales genes que condicionan la magnitud de los diferentes compartimentos corporales⁶⁶. Esto, sumado a los avances en tecnología para estimar la composición corporal total y su distribución, ha permitido una mejor diferenciación de los fenotipos y un aislamiento selectivo de los genes que los condicionan. Con la utilización de métodos densiométricos directos llegó a establecerse que la varianza total del % masa grasa se explicaba en un 25% por factores genéticos y un 30% por la influencia medioambiental, lo que llevó a asumir en la década de los 90 la existencia de un gen principal que condicionaba la acumulación de grasa en el organismo. Esta asunción parece confirmarse al encontrar fuertes asociaciones entre algunos polimorfismos de la ACE (abreviatura inglesa para la encima convertidora de la angiotensina) I/D y la masa grasa, o el gen del receptor de la vitamina D y la densidad mineral ósea⁶⁷ la cual condiciona la aplicabilidad de algunos modelos densiométricos. Actualmente existen varias líneas mundiales de investigación en el campo de la genética de la composición corporal, siendo el grupo Claude Bouchard (en su época en la Universidad de Laval, Canadá) uno de los más importantes del siglo XX en el área de la genética de la actividad física y la composición corporal. Uno de los estudios más importantes de este campo son el del Corazón de Framingham, la Investigación de Fitness de Canada, el Estudio Familiar de Québec o el de HERITAGE (estos dos últimos dirigidos por el propio Bouchard), y, por supuesto, en nuestro país, no podemos olvidar el estudio Familiar de Madrid⁶⁹. Para una mayor ampliación en este cam-

po se sugiere la lectura de algunas publicaciones específicas al respecto⁶³.

Otro aspecto muy importante para la nueva era de la composición corporal, será el estudio de la composición corporal dinámica, y de los métodos que son necesarios para evaluarla. Esta área incluye el estudio de las relaciones dinámicas entre los componentes del cuerpo y las funciones que les son propias⁷⁰. Los cambios en la composición corporal pueden y deben estar relacionados con diversas condiciones fisiológicas y patológicas. El concepto de la composición corporal funcional nos da una visión más sofisticada del estado nutricional, metabólico, del rendimiento físico o de la enfermedad¹. Más que una evaluación de componentes corporales, este concepto está relacionado con las interacciones cuantitativas y biológicas de los componentes, con el equilibrio energético, las funciones metabólicas, los biomarcadores de salud o la capacidad de trabajo⁷⁰. Por ejemplo, el "modeling" (estimación mediante ecuaciones) de las adaptaciones metabólicas durante programas de pérdida de peso necesita una interpretación dinámica que considere el cambio del peso desde un punto de vista de multicomponentes (ver segunda parte de la revisión). Por ello, el conocimiento del cambio de la densidad del peso perdido, asociado con la utilización de energía durante el programa, podrá ofrecernos una mejor interpretación de la intervención y de las soluciones óptimas⁷¹. Aunque este es un concepto recientemente retomado, su importancia ya había sido advertida por Quetelet, que intentó determinar las perturbaciones del cuerpo, las influencias y sus causas naturales. Con sus datos, aunque limitados por la tecnología de la época, ya describió un hombre "medio" estático, pero también desde el punto de vista dinámico¹⁷.

En cuanto a las metodologías de evaluación de la composición corporal, cada día son más comunes en los laboratorios de fisiología del ejercicio y en los propios centros de investigación. Sin duda, uno de los avances más interesantes en este sentido es la creación de nuevos programas informáticos y sistemas de análisis automáticos, que facilitan mucho los procedimientos de evaluación, disminuyendo tiempos y costes; además, la tecnología de procesamiento de imágenes ha permitido un análisis de la composición corporal regional, permitiendo realizar inferencias fisiológicas más precisas^{72,73} y comprobar adaptaciones específicas de los tejidos y compartimentos moleculares en respuesta a intervenciones, por ejemplo, utilizando DXA⁷⁴, ecografía⁷⁵ o resonancia magnética⁷⁶.

En la Península Ibérica el comienzo del siglo XXI ha visto nacer grupos de investigación que han orientado su trabajo de forma específica al estudio de la composición corporal. Sin duda, el más importante de ellos es el grupo del Laboratorio de Ejercicio y Salud de la Facultad de Motricidad Humana de Lisboa, único centro de la península que puede aplicar modelos de más de 4 componentes para el estudio de la composición corporal⁷⁷⁻⁷⁹. En España existen grupos

que se han especializado en algunos componentes específicos, por ejemplo, el grupo del Laboratorio de Rendimiento Humano, Ejercicio Físico y Salud, de las Palmas de Gran Canaria ha sido pionero en estudiar el mineral óseo y sus asociaciones con la actividad física⁸⁰⁻⁸⁴. A estos estudios se unen los clásicos asociados a la parte clínica para el diagnóstico de la osteoporosis, que datan ya de los años 90 y principios del 2000, principalmente utilizando DXA^{85,86}. Con respecto a la composición corporal global (análisis de cuerpo entero), el mismo grupo de la Universidad de las Palmas, publicó los primeros datos con la utilización de la DXA para cuantificar la composición corporal en deportistas, evaluando un grupo de tenistas a finales de los 90⁸¹. Estos trabajos han continuado hasta la fecha con el estudio de niños Canarios⁸⁷ y otras modalidades deportivas, con especial relevancia en el estudio de la masa ósea^{82,83,88}. El grupo del laboratorio de Biodinámica y Composición Corporal de la Universidad de Málaga, ha desarrollado estudios específicos de composición corporal, siendo uno de los impulsores de la aplicación de la técnica de dilución de deuterio para estudiar el agua corporal total en escolares españoles⁸⁹. El grupo GENUD de la Universidad de Zaragoza, junto con el grupo EFFECTS de la Universidad de Granada, han sido pioneros realizando los primeros estudios epidemiológicos nacionales sobre condición física, nutrición y composición corporal evaluada con la técnica antropométrica (estudios AVENA y HELENA)^{90,91}. Con respecto a los procedimientos, parece que la antropometría está totalmente extendida por clínicas, centros deportivos e incluso escuelas españolas. En este sentido, el Grupo Español de Cineantropometría (GREC) ha desarrollado una intensa labor de formación en los últimos años, lo cual ha ayudado en gran medida a la promoción de esta técnica entre profesionales e investigadores. Por otro lado, numerosas empresas biomédicas han aumentado la venta de las bioimpedancias monofrecuencia, que se han instalado definitivamente en numerosos contextos laborales y en los hogares de los españoles, ayudando a introducir en la cultura física de los ciudadanos la composición corporal. Merece una especial referencia en el cierre de este apartado el español Jesús Culebras, que trabajó con Francis Moore en la universidad de Harvard durante los años setenta para perfeccionar los procedimientos de evaluación del agua corporal total^{92,93}.

En resumen, podemos concluir que la composición corporal es una realidad patente en el terreno científico en el mundo. En España se ha consolidado como un área específica de estudio durante la última década. Además, ya forma parte de la práctica cotidiana de los profesionales de las ciencias de la actividad física y los deportes, la nutrición y la medicina. Sin embargo, los paradigmas en los que se asientan sus bases, protocolos y metodologías son todavía desconocidos para gran parte de los profesionales y de la comunidad científica emergente. Todos los avances científicos descritos y

desarrollados durante el siglo xx han derivado en un sistema jerárquico de organización del estudio de la composición corporal⁹⁴, que se presentará en la segunda parte de esta revisión.

Referencias

1. Sardinha LB. Functional Body Composition: Need for a New Agenda. *Arch Exerc Health Dis.* 2012; 3:183-7.
2. Heyward VH. Evaluation of body composition. Current issues. *Sports Med.* 1996; 22:146-56.
3. Moore FD, Boyden CM. Body Cell Mass and Limits of Hydration of the Fat-Free Body: Their Relation to Estimated Skeletal Weight. *Ann N Y Acad Sci.* 1963; 110:62-71.
4. Silva AM, Fields DA, Heymsfield SB, Sardinha LB. Body composition and power changes in elite judo athletes. *Int J Sports Med.* 2010; 31:737-41.
5. Silva AM, Santos DA, Matias CN, Rocha PM, Petroski EL, Minderico CS, et al. Changes in regional body composition explain increases in energy expenditure in elite junior basketball players over the season. *Eur J Appl Physiol.* 2012; 112:2727-37.
6. Silva DA, Benedetti TR, Ferrari EP, Meurer ST, Antes DL, Silva AM, et al. Anthropometric profiles of elite older triathletes in the Ironman Brazil compared with those of young Portuguese triathletes and older Brazilians. *J Sports Sci.* 2012; 30:479-84.
7. WHO, editor. Global strategy on diet, physical activity and health. Fifty-Seventh World Health Assembly; 2004; Geneva: World Health Organization.
8. Ogden CL, Carroll MD, Curtin LR, McDowell MA, Tabak CJ, Flegal KM. Prevalence of overweight and Obesity in the United States 1999-2004. *JAMA.* 2006; 295:1549-55.
9. Branca F, Nikogosian H, Lobstein T. The Challenge of Obesity in the WHO European Region and the Strategies for Response. Copenhagen: World Health Organization 2007.
10. Valdes Pizarro J, Royo-Bordonada MA. Prevalence of childhood obesity in Spain: National Health Survey 2006-2007. *Nutr Hosp.* 2012; 27:154-60.
11. Bouchard C. The Obesity Epidemic. In: Bouchard C, editor. Physical Activity and Obesity. Champaign: Human Kinetics; 2000.
12. Grant MJ, Booth A. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health information and libraries journal.* 2009; 26:91-108.
13. Schultz SG. William Harvey and the circulation of the blood: the birth of a scientific revolution and modern physiology. *News Physiol Sci.* 2002; 17:175-80.
14. Bergstrom J, Hermansen L, Hultman E, Saltin B. Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiol Scand.* 1967; 71:140-50.
15. Bale P. Body composition and menstrual irregularities of female athletes. Are they precursors of anorexia? *Sports Med.* 1994; 17:347-52.
16. Wang ZM. Human body composition models and methodology: Theory and experiment [PhD]. Wageningen: Wageningen Agricultural University; 1997.
17. Quetelet LA. A treatise on man and the development of his faculties. 1842. *Obes Res.* 1994; 2:72-85.
18. Mendel LB, Judson SE. Some Interrelations Between Diet, Growth, and the Chemical Composition of the Body. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 1916; 2:692-4.
19. Humphrey DC. Dissection and discrimination: the social origins of cadavers in America, 1760-1915. *Bull N Y Acad Med.* 1973; 49:819-27.
20. Clarys JP, Martin AD, Drinkwater DT. Gross tissue weights in the human body by cadaver dissection. *Hum Biol.* 1984; 56:459-73.
21. Wang Z, Wang ZM, Heymsfield SB. History of the study of human body composition: A brief review. *Am J Hum Biol.* 1999; 11:157-65.

22. Trotter M. Variable factors in skeleton weight. *Hum Biol.* 1956; 28:146-53.
23. Edelman IS, Olney JM, James AH, Brooks L, Moore FD. Body Composition: Studies in the Human Being by the Dilution Principle. *Science.* 1952; 115:447-54.
24. Behnke AR, Feen BG, Welham WC. The specific gravity of healthy men. *JAMA.* 1942; 118:495-8.
25. Keys A, Brozek J. Body fat in adult man. *Physiol Rev.* 1953; 33:245-325.
26. Ellis KJ. Selected body composition methods can be used in field studies. *J Nutr.* 2001; 131:1589S-95S.
27. Moore FD. Determination of total body water and solids with isotopes. *Science.* 1946; 104:157-60.
28. Forbes GB, Hursh JB. Age and Sex Trends in Lean Body Mass Calculated from K40 Measurements: With a Note on the Theoretical Basis for the Procedure. *Ann N Y Acad Sci.* 1963; 110:255-63.
29. Fischer E, Moore JW, Skowlund HV, Ryland KW, Copenhagen NJ. The potassium permeability and the capacity for potassium storage of normal and atrophied muscle, investigated with the radioactive isotope K42. *Arch Phys Med Rehabil.* 1950; 31:429-41.
30. Merz AL, Trotter M, Peterson RR. Estimation of skeleton weight in the living. *Am J Phys Anthropol.* 1956; 14:589-609.
31. Baker PT, Schraer H. The estimation of dry skeletal weight by photometry of roentgenograms. *Hum Biol.* 1958; 30:171-84.
32. Schoeller DA. Changes in total body water with age. *Am J Clin Nutr.* 1989; 50:1176-81; discussion 231-5.
33. Suarez M, Teijeira J, Marquesan G. [Radiographical and chemical estimation of body water in children. III. Volume of intracellular water and volume of radiographical muscle mass of the leg; a new index of muscle mass]. *Rev Esp Pediatr.* 1956; 12:831-4.
34. Fomon SJ, Haschke F, Ziegler EE, Nelson SE. Body composition of reference children from birth to age 10 years. *Am J Clin Nutr.* 1982; 35:1169-75.
35. Fidanza F, Keys A, Anderson JT. Density of body fat in man and other mammals. *J Appl Physiol.* 1953; 6:252-6.
36. Siri WR. Body composition from fluid spaces and density; analysis of methods. In: Brozek JA, A., editor. *Techniques for measuring body composition.* Washington D.C.: A. Nat. Acad. Sci.; 1961. p. 223-44.
37. Thomasset MA. [Bioelectric properties of tissue. Impedance measurement in clinical medicine. Significance of curves obtained]. *Lyon Med.* 1962; 94:107-18.
38. Anderson J, Osborn SB, Tomlinson RW, Newton D, Rundo J, Salmon L, et al. Neutron-Activation Analysis in Man in Vivo. A New Technique in Medical Investigation. *Lancet.* 1964; 2:1201-5.
39. Cohn SH, Dombrowski CS. Measurement of total-body calcium, sodium, chlorine, nitrogen, and phosphorus in man by in vivo neutron activation analysis. *Journal of nuclear medicine: official publication, Society of Nuclear Medicine.* 1971; 12:499-505.
40. Heymsfield SB, Olafson RP, Kutner MH, Nixon DW. A radiographic method of quantifying protein-calorie undernutrition. *The American journal of clinical nutrition.* 1979; 32:693-702.
41. Pollock ML, Foster C, Anholm J, Hare J, Farrell P, Maksud M, et al. Body composition of Olympic speed skating candidates. *Res Q Exerc Sport.* 1982; 53:150-5.
42. Mazess RB, Peppler WW, Gibbons M. Total body composition by dual-photon (153Gd) absorptiometry. *Am J Clin Nutr.* 1984; 40:834-9.
43. Snyder W, Cook M, Nasset E, Karhausen L, Howells G, Tipton I. Report of the Task Group on Reference Man. Protection ICoR, editor. Oxford, UK: Pergamon; 1975.
44. Zillikens MC, Conway JM. Anthropometry in blacks: applicability of generalized skinfold equations and differences in fat patterning between blacks and whites. *Am J Clin Nutr.* 1990; 52:45-51.
45. Brodie D, Moscrip V, Hutcheon R. Body composition measurement: a review of hydrodensitometry, anthropometry, and impedance methods. *Nutrition.* 1998; 14:296-310.
46. Slaughter MH, Lohman TG, Boileau RA, Horswill CA, Stillman RJ, Van Loan MD, et al. Skinfold equations for estimation of body fatness in children and youth. *Hum Biol.* 1988; 60:709-23.
47. Deurenberg P, van der Kooy K, Leenen R, Weststrate JA, Seidell JC. Sex and age specific prediction formulas for estimating body composition from bioelectrical impedance: a cross-validation study. *Int J Obes.* 1991; 15:17-25.
48. Kushner RF, Kunigk A, Alspaugh M, Andronis PT, Leitch CA, Schoeller DA. Validation of bioelectrical-impedance analysis as a measurement of change in body composition in obesity. *Am J Clin Nutr.* 1990; 52:219-23.
49. Lukaski HC, Bolonchuk WW, Hall CB, Siders WA. Validation of tetrapolar bioelectrical impedance method to assess human body composition. *J Appl Physiol.* 1986; 60:1327-32.
50. Varady KA, Santosa S, Jones PJ. Validation of hand-held bioelectrical impedance analysis with magnetic resonance imaging for the assessment of body composition in overweight women. *Am J Hum Biol.* 2007; 19:429-33.
51. Jackson AS, Pollock ML. Generalized equations for predicting body density of men. *Br J Nutr.* 1978; 40:497-504.
52. Jackson AS, Pollock ML. Prediction accuracy of body density, lean body weight, and total body volume equations. *Med Sci Sports.* 1977; 9:197-201.
53. Durnin JV, Womersley J. Total body fat, calculated from body density, and its relationship to skinfold thickness in 571 people aged 12-72 years. *The Proceedings of the Nutrition Society.* 1973; 32:45A.
54. Durnin JV, Womersley J. Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 years. *The British journal of nutrition.* 1974; 32:77-97.
55. Dempster P, Aitkens S. A new air displacement method for the determination of human body composition. *Medicine and science in sports and exercise.* 1995; 27:1692-7.
56. Armellini F, Zamboni M, Robbi R, Todesco T, Rigo L, Bergamo-Andreis IA, et al. Total and intra-abdominal fat measurements by ultrasound and computerized tomography. *International journal of obesity and related metabolic disorders: journal of the International Association for the Study of Obesity.* 1993; 17:209-14.
57. Armellini F, Zamboni M, Rigo L, Robbi R, Todesco T, Castelli S, et al. Measurements of intra-abdominal fat by ultrasound and computed tomography: predictive equations in women. *Basic life sciences.* 1993; 60:75-7.
58. Suzuki R, Watanabe S, Hirai Y, Akiyama K, Nishide T, Matsushima Y, et al. Abdominal wall fat index, estimated by ultrasonography, for assessment of the ratio of visceral fat to subcutaneous fat in the abdomen. *The American journal of medicine.* 1993; 95:309-14.
59. Leahy S, Toomey C, McCreesh K, O'Neill C, Jakeman P. Ultrasound measurement of subcutaneous adipose tissue thickness accurately predicts total and segmental body fat of young adults. *Ultrasound in medicine & biology.* 2012; 38:28-34.
60. Seibert H, Pereira AM, Ajzen SA, Nogueira PC. Abdominal circumference measurement by ultrasound does not enhance estimating the association of visceral fat with cardiovascular risk. *Nutrition.* 2013; 29:393-8.
61. Deurenberg P, Schouten FJ, Andreoli A, de Lorenzo A. Assessment of changes in extra-cellular water and total body water using multi-frequency bio-electrical impedance. *Basic Life Sci.* 1993; 60:129-32.
62. De Lorenzo A, Candeloro N, Andreoli A, Deurenberg P. Determination of intracellular water by multifrequency bioelectrical impedance. *Ann Nutr Metab.* 1995; 39:177-84.
63. Bouchard C, Malina RM, Pérusse L. Understanding the Methods. In: Bouchard C, Malina RM, Pérusse L, editors. *Genetics of Fitness and Physical Performance.* Champaign: Human Kinetics; 1997. p. 59-84.
64. Katzmarzyk P, Bouchard C. Genetic Influences on Human Body Composition. In: Heymsfield SB, Lohman TG, Wang ZM, Going SB, editors. *Human Body Composition.* Champaign: Human Kinetics; 2005. p. 243-57.

65. Bouchard C, Malina RM, Pérusse L. Genetics of Body Fat and Fat Distribution. In: Bouchard C, Malina RM, Pérusse L, editors. *Genetics of Fitness and Physical Performance. Champaign: Human Kinetics*; 1997. p. 173-209.
66. Rankinen T, Bray MS, Hagberg JM, Pérusse L, Roth SM, Wolfarth B, et al. The Human Gene Map for Performance and Health-Related Fitness Phenotypes: The 2005 Update. *Med Sci Sports Exerc.* 2006; 38:1863-88.
67. Bouchard DR, Malina RM, Pérusse L. Genetics of Body Fat and Fat Distribution. In: Bouchard DR, Malina RM, Pérusse L, editors. *Genetics of Fitness and Physical Performance. Champaign: Human Kinetics*; 1997. p. 173-209.
68. Wang Z, Deurenberg P, Wang W, Pietrobelli A, Baumgartner RN, Heymsfield SB. Hydration of fat-free body mass: review and critique of a classic body-composition constant. *Am J Clin Nutr.* 1999; 69:833-41.
69. Sanchez-Andres A. Genetic and environmental influences on somatotype components: Family study in a Spanish population. *Hum Biol.* 1995; 67:727-38.
70. Muller MJ. From BMI to functional body composition. *Eur J Clin Nutr.* 2013; 67:1119-21.
71. Muller MJ, Bosy-Westphal A, Heller M. 'Functional' body composition: differentiating between benign and non-benign obesity. *F1000 Biol Rep.* 2009; 1:75.
72. Tomas MT, Santa-Clara MH, Monteiro E, Baynard T, Carneiro EA, Bruno PM, et al. Body composition, muscle strength, functional capacity, and physical disability risk in liver transplanted familial amyloidotic polyneuropathy patients. *Clin Transplant.* 2011; 25:E406-14.
73. Amati F, Dube JJ, Alvarez-Carnero E, Edreira MM, Chomentowski P, Coen PM, et al. Skeletal muscle triglycerides, diacylglycerols, and ceramides in insulin resistance: another paradox in endurance-trained athletes? *Diabetes.* 2011; 60:2588-97.
74. Carnero EA, Amati F, Pinto RS, Valamatos MJ, Mil-Homens P, Sardinha LB. Regional fat mobilization and training type on sedentary, premenopausal overweight and obese women. *Obesity (Silver Spring).* 2014; 22: 86-93.
75. Teixeira PJ, Rocha P, Carnero E, Sardinha LB. Relationship between absorptiometry and ultrasound measurements of abdominal subcutaneous fat tissue in postmenopausal women. *Acta Diabetol.* 2003; 40 Suppl 1:S76-8.
76. Goodpaster BH, Chomentowski P, Ward BK, Rossi A, Glynn NW, Delmonico MJ, et al. Effects of physical activity on strength and skeletal muscle fat infiltration in older adults: a randomized controlled trial. *Journal of applied physiology.* 2008; 105:1498-503.
77. Silva AM, Minderico CS, Teixeira PJ, Pietrobelli A, Sardinha LB. Body fat measurement in adolescent athletes: multicompartiment molecular model comparison. *Eur J Clin Nutr.* 2006; 60:955-64.
78. Minderico CS, Silva AM, Keller K, Branco TL, Martins SS, Palmeira AL, et al. Usefulness of different techniques for measuring body composition changes during weight loss in overweight and obese women. *Br J Nutr.* 2008; 99:432-41.
79. Matias CN, Santos DA, Fields DA, Sardinha LB, Silva AM. Is bioelectrical impedance spectroscopy accurate in estimating changes in fat-free mass in judo athletes? *J Sports Sci.* 2012; 30:1225-33.
80. Guadalupe-Grau A, Fuentes T, Calbet JAL. Exercise and Bone Mass in Adults. *Sports Med.* 2009; 39:439-68.
81. Calbet JA, Moysi JS, Dorado C, Rodriguez LP. Bone mineral content and density in professional tennis players. *Calcif Tissue Int.* 1998; 62:491-6.
82. Calbet JA, Dorado C, Diaz-Herrera P, Rodriguez-Rodriguez LP. High femoral bone mineral content and density in male football (soccer) players. *Med Sci Sports Exerc.* 2001; 33:1682-7.
83. Vicente-Rodriguez G, Dorado C, Perez-Gomez J, Gonzalez-Henriquez JJ, Calbet JA. Enhanced bone mass and physical fitness in young female handball players. *Bone.* 2004; 35:1208-15.
84. Calbet JA, Diaz Herrera P, Rodriguez LP. High bone mineral density in male elite professional volleyball players. *Osteoporos Int.* 1999; 10:468-74.
85. Diaz Curiel M, Carrasco de la Pena JL, Honorato Perez J, Perez Cano R, Rapado A, Ruiz Martinez I. Study of bone mineral density in lumbar spine and femoral neck in a Spanish population. Multicentre Research Project on Osteoporosis. *Osteoporos Int.* 1997; 7:59-64.
86. Diaz Curiel M, Garcia JJ, Carrasco JL, Honorato J, Perez Cano R, Rapado A, et al. [Prevalence of osteoporosis assessed by densitometry in the Spanish female population]. *Med Clin (Barc).* 2001; 116:86-8.
87. Ara I, Vicente-Rodriguez G, Jimenez-Ramirez J, Dorado C, Serrano-Sanchez JA, Calbet JA. Regular participation in sports is associated with enhanced physical fitness and lower fat mass in prepubertal boys. *Int J Obes Relat Metab Disord.* 2004; 28:1585-93.
88. Perez-Gomez J, Olmedillas H, Delgado-Guerra S, Ara I, Vicente-Rodriguez G, Ortiz RA, et al. Effects of weight lifting training combined with plyometric exercises on physical fitness, body composition, and knee extension velocity during kicking in football. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2008; 33:501-10.
89. Alvero-Cruz JR, Alvarez Carnero E, Fernandez-Garcia JC, Barrera Exposito J, Carrillo de Albornoz Gil M, Sardinha LB. [Validity of body mass index and fat mass index as indicators of overweight status in Spanish adolescents: Escuela Study]. *Med Clin (Barc).* 2010; 135:8-14.
90. Moreno LA, Mesana MI, Fleta J, Ruiz JR, Gonzalez-Gross M, Sarria A, et al. Overweight, obesity and body fat composition in spanish adolescents. The AVENA Study. *Ann Nutr Metab.* 2005; 49:71-6.
91. Moreno LA, Gonzalez-Gross M, Kersting M, Molnar D, de Henauw S, Beghin L, et al. Assessing, understanding and modifying nutritional status, eating habits and physical activity in European adolescents: the HELENA (Healthy Lifestyle in Europe by Nutrition in Adolescence) Study. *Public Health Nutr.* 2008; 11:288-99.
92. Culebras JM, Fitzpatrick GF, Brennan MF, Boyden CM, Moore FD. Total body water and the exchangeable hydrogen. II. A review of comparative data from animals based on isotope dilution and desiccation, with a report of new data from the rat. *Am J Physiol.* 1977; 232:R60-5.
93. Culebras JM, Moore FD. Total body water and the exchangeable hydrogen. I. Theoretical calculation of nonaqueous exchangeable hydrogen in man. *Am J Physiol.* 1977; 232:R54-9.
94. Wang ZM, Heshka S, Pierson RN, Jr., Heymsfield SB. Systematic organization of body-composition methodology: an overview with emphasis on component-based methods. *Am J Clin Nutr.* 1995; 61:457-65.