612.044
L864f
2006
c.1

Fisiología del Ejercicio

3.ª Edición

José López Chicharro

Catedrático de la Escuela Universitaria de Enfermería, Fisioterapia y Podología. Departamento de Enfermería. Universidad Complutense de Madrid.

Almudena Fernández Vaquero

Profesora Adjunta de la Facultad de Ciencias de la Salud. Departamento de Ciencias Morfológicas y Fisiología de la Universidad Europea de Madrid.

EDITORIAL MÉDICA panamericana

BUENOS AIRES - BOGOTÁ - CARACAS - MADRID - MÉXICO - SÃO PAULO

www.medicapanamericana.com

Catalogación en Publicación de la Biblioteca Nacional

López Chicharro, José

Fisiología del ejercicio / José López Chicharro, Almudena Fernández Vaquero. — 3.ª ed. — Buenos Aires ; Madrid : Médica Panamericana, [2006]
XVIII, 987 p. : il. col. ; 28 cm

ISBN 84-7903-983-3

1. Fisiología del ejercicio. I. Fernández Vaquero, Almudena. II. Título.

612.766.1

1.ª edición, octubre 1995
2.ª edición, junio 1996
3.ª edición, marzo 2006

La medicina es una ciencia en permanente cambio. A medida que las nuevas investigaciones y la experiencia clínica amplían nuestro conocimiento, se requieren modificaciones en las modalidades terapéuticas y en los tratamientos farmacológicos. Los autores de esta obra han verificado toda la información con fuentes confiables para asegurarse que ésta sea completa y acorde con los estándares aceptados en el momento de la publicación. Sin embargo, en vista de la posibilidad de un error humano o cambios en las ciencias médicas, ni los autores, ni la editorial, o cualquier otra persona implicada en la preparación o la publicación de este trabajo, garantizan que la totalidad de la información aquí contenida sea exacta o completa y no se responsabilizan por errores u omisiones o por los resultados obtenidos del uso de esta información. Se aconseja a los lectores confirmarla con otras fuentes. Por ejemplo, y en particular, se recomienda a los lectores revisar el prospecto de cada fármaco que planean administrar para cerciorarse de que la información contenida en este libro sea correcta y que no se hayan producido cambios en las dosis sugeridas o en las contraindicaciones para su administración. Esta recomendación cobra especial importancia con respecto a fármacos nuevos o de uso infrecuente.

Los Editores han hecho todos los esfuerzos para localizar a los titulares del copyright del material fuente utilizado por el autor. Si por error u omisión, no se ha citado algún titular, se subsanará con la próxima reimpresión

Gracias por comprar el original. Este libro es producto del esfuerzo de profesionales como usted, o de sus profesores, si usted es estudiante. Tenga en cuenta que fotocopiarlo es una falta de respeto hacia ellos y un robo de sus derechos intelectuales.

EDITORIAL MÉDICA panamericana

Visite nuestra página web:
http://www.medicapanamericana.com

ARGENTINA
Marcelo T. de Alvear 2 145 (C 1122 AAG) - Buenos Aires, Argentina
Tel.: (54-11) 4821-5520/2066 / Fax: (54-11) 4821-1214
e-mail: info@medicapanamericana.com

COLOMBIA
Carrera 7a A Nº 69-19 - Santa Fe de Bogotá DC - Colombia
Tel.: (57-1) 235-4068 / Fax: (57-1) 345-0019
e-mail: infomp@medicapanamericana.com.co

ESPAÑA
Alberto Alcocer, 24 - 28036 Madrid, España
Tel.: (34-91) 1317800 / Fax: (34-91) 1317805
e-mail: info@medicapanamericana.es

MÉXICO
Hegel 141, 2.º piso
Col. Chapultepec Morales - Deleg. Miguel Hidalgo - 11570 - Mexico D.F. - México
Tel.: (52-55) 5262-9470 / Fax: (52-55) 2624-2827
e-mail: infomp@medicapanamericana.com.mx

VENEZUELA
Edificio Polar, Torre Oeste, Piso 6, Of. 6-C
Plaza Venezuela, Urbanización Los Caobos,
Parroquia El Recreo, Municipio Libertador - Caracas Depto. Capital - Venezuela
Tel.: (58-212) 793-2857/6906/5985/1666
Fax: (58-212) 793-5885
e-mail: info@medicapanamericana.com.ve

ISBN: 84-7903-983-3

Todos los derechos reservados. Este libro o cualquiera de sus partes no podrán ser reproducidos ni archivados en sistemas recuperables, ni transmitidos en ninguna forma o por ningún medio, ya sean mecánicos, electrónicos, fotocopiadoras, grabaciones o cualquier otro, sin el permiso previo de Editorial Médica Panamericana, S. A.

© 2006, EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA, S. A.
Alberto Alcocer, 24 - 28036 Madrid

Depósito Legal: M. 8387 - 2006
Impreso en España

CAPÍTULO
1

Fisiología del ejercicio: concepto y revisión histórica

J. A. López Calbet

Aunque no existe una definición universalmente aceptada de fisiología del ejercicio, desde el punto de vista etimológico, las raíces del término fisiología se remontan al griego clásico. Los griegos emplearon el término *physis* para referirse a la naturaleza, mientras que denominaron *physiologoi* a los eruditos y sabios que dedicaban su tiempo al estudio de la naturaleza, que prodríamos equiparar con los actuales fisiólogos. Así, en sus orígenes, la fisiología fue considerada como «el conjunto de saberes o ciencia cuyo objeto era el estudio de la naturaleza». Desde la antigua Grecia hasta la actualidad, el acerbo de saberes y conocimientos integrados en la antigua *physis* aristotélica se ha ido disgregando y organizando en nuevas ramas y estructuras de conocimiento que han llevado a la aparición de nuevas disciplinas científicas. El término «ejercicio» tiene sus orígenes etimológicos en el latín, a partir de la palabra *exercitium*, que los romanos usaron para referirse a los movimientos corporales repetidos, a la actividad física. Entre las numerosas acepciones que tiene la palabra «ejercicio» en español, el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española define el ejercicio como «cualquier movimiento corporal repetido y destinado a conservar la salud o recobrarla».

A la fisiología del ejercicio también se la ha denominado fisiología del esfuerzo. El término «esfuerzo» es definido por el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española como «el empleo enérgico de la fuerza física contra algún impulso o resistencia» o como «empleo enérgico del vigor o actividad del ánimo para conseguir una cosa venciendo dificultades». Sin embargo, en el ámbito de la educación física y la medicina deportiva el esfuerzo se entiende como equivalente de actividad física. Por ello, resulta mucho más adecuado usar el vocablo «ejercicio» para referirse a la actividad física. De hecho, la *American Physiological Society*, utiliza para referirse a la fisiología del esfuerzo la denominación «exercise physiology», existiendo una sección o especialización en la *American Physiological Society* para «exercise physiologists».

Tal y como describe Rothschuh (1973), Galeno definió la fisiología como el estudio de la naturaleza del hombre. Una definición más actual de fisiología sería: *ciencia que estudia la naturaleza de los organismos vivos en una vertiente funcional; es decir, el estudio del funcionamiento de los diversos aparatos y sistemas de los seres vivos, su regulación e interacción.* Dentro de la fisiología se distingue entre fisiología animal y fisiología vegetal, cada una de ellas divididas en dos grandes disciplinas: fisiología general y fisiología especial. La fisiología general se ocupa del estudio de las funciones vitales básicas y comunes a un conjunto de seres vivos, por lo que también ha sido denominada fisiología celular. La fisiología especial se ocupa de un ser vivo concreto. Así, la fisiología especial humana se dedica al estudio de las funciones que realizan en el ser humano los órganos, aparatos y sistemas, tanto en sus aspectos más específicos y concretos como en sus aspectos más globales y de integración funcional. Sin embargo, el conocimiento fisiológico ha adquirido un elevado grado de profundidad en los últimos 100 años, lo

que ha llevado a su parcelación en especialidades: fisiología nerviosa, endocrina, cardiovascular, etc. Además, han surgido especializaciones de corte transversal, en las que se integran los conocimientos acerca del funcionamiento de los órganos y sistemas en condiciones muy concretas, como el envejecimiento, el esfuerzo físico, la permanencia en el espacio exterior, etc. Estas especialidades de la fisiología están reconocidas como tales por la *American Physiological Society*, que considera que el campo de estudio de la fisiología del ejercicio abarca los siguientes aspectos:

1. El estudio del funcionamiento e interacciones de los órganos, aparatos y sistemas del cuerpo humano durante el ejercicio físico, desde el nivel molecular hasta el funcionamiento del cuerpo entero. Es importante señalar que en el último tercio del siglo XX se asistió a un entusiasmo sin precedentes por estudiar con un enfoque cada vez más reduccionista el funcionamiento de los sistemas corporales, lo que dio lugar al nacimiento de la biología molecular. Aunque el conocimiento del funcionamiento a nivel molecular es muy importante y ha propiciado, de hecho, enormes avances en el conocimiento, el fisiólogo, y especialmente el fisiólogo del ejercicio, debe integrar los conocimientos que proporciona la biología molecular en el funcionamiento del cuerpo entero, entendido como una unidad funcional en sí mismo. Pues tal y como ya propugnó el eminente físico francés Blaise Pascal en el siglo XVII: «es tan igualmente imposible conocer las partes sin conocer la totalidad, como conocer la totalidad sin conocer sus partes integrantes en detalle».
2. El estudio de los mecanismos que limitan el rendimiento y funcionamiento de los órganos y sistemas en condiciones de estrés severo. No debe sorprendernos, pues, que algunos de los más renombrados fisiólogos del ejercicio trabajen en unidades de cuidados intensivos o sean anestesistas.
3. El estudio de las adaptaciones o cambios temporales ocasionados por el ejercicio físico en la estructura y funciones de los órganos y sistemas que integran el cuerpo humano, a nivel molecular, celular, tisular, orgánico y sistémico.

Así pues, hemos definido la fisiología del ejercicio como la *ciencia que estudia el funcionamiento de los órganos, aparatos y sistemas que componen el organismo humano durante el ejercicio físico, desde el nivel molecular y celular hasta el nivel integral de la persona, la interrelación existente entre ellos y con el medio externo, así como los mecanismos de regulación e integración funcional que hacen posible la realización del ejercicio físico. Además, abarca el estudio de las modificaciones tanto estructurales como funcionales que la práctica crónica de ejercicio, o entrenamiento físico, ocasiona.*

ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA FISIOLOGÍA DEL EJERCICIO

Antes de iniciar el análisis de los acontecimientos históricos que han desembocado en el nacimiento de la fisiología del ejercicio como entidad académica y científica, cabe plantearse la cuestión de cuándo han comenzado las aportaciones cuyo conocimiento sea interesante para la compresión del *statu quo* de la fisiología del ejercicio y, sobre todo, qué utilidad puede tener el conocerlas. La respuesta del positivismo para estas dos interrogaciones dice así: «*Para el hombre de ciencia, incluso para todo hombre reflexivo, el pasado sólo comienza a poseer interés verdadero, deja, por tanto, de ser mera curiosidad erudita cuando la mente humana ha aprendido a atenerse exclusivamente a los hechos positivos —observación directa, cómputo matemático, medida instrumental o análisis experimental del mundo— y a las relaciones científicas que entre ellos puedan establecerse. Con anterioridad a tal modo de proceder, esto es, durante todos los siglos que anteceden a la época de cultura europea que solemos llamar Renacimiento, los hombres, salvo contadas excepciones, habrían conocido el mundo y hecho su vida orientados por concepciones puramente míticas o vacuamente especulativas acerca de la realidad*» (Laín Entralgo, 1978). Además, un análisis de los antecedentes históricos de todo problema constituye una buena reflexión que en mucho contribuye a paliar la proclividad de muchos hombres de ciencia a confundir «lo actualmente en vigor» con «lo definitivamente válido» (Laín Entralgo, 1978).

Por lo tanto, para facilitar la comprensión de lo que actualmente representa la fisiología del ejercicio, de los métodos que utiliza, de los fines que tiene y de las razones que han llevado a su inclusión como materia diferenciada en numerosos planes de estudio de educación física, medicina, fisioterapia y dietética-nutrición, tanto nacionales como de otros países, examinaremos los orígenes y la evolución histórica

de las Ciencias que han influido en mayor medida en el nacimiento de la fisiología y de la fisiología del ejercicio, pues *las cosas se entienden mejor cuando uno ha logrado ver con alguna claridad cómo se formaron* (Aristóteles, citado por Laín Entralgo, 1978). Posteriormente, abordaremos el devenir histórico de la fisiología del ejercicio.

El período preclásico: los valores del ejercicio en los pueblos primitivos

La demostración del vigor físico parece consustancial a la naturaleza de numerosas especies, incluidos los primates, poniéndose de manifiesto en la competencia a través de la lucha, ya sea por el dominio del territorio, la consecución de alimentos, la preservación de la vida o la reproducción. Por ejemplo, los primates son animales sociales que viven en grupo dirigidos por un macho dominante que adquiere esta posición y la mantiene a través de continuos enfrentamientos y demostraciones de poder físico. En efecto, si analizamos las prácticas físicas de las sociedades prehistóricas y de los pueblos primitivos, resulta evidente la existencia de numerosas expresiones rituales dirigidas a demostrar poderío físico. En estas sociedades la supervivencia estaba vinculada en mayor o menor grado a la capacidad de esfuerzo físico. El éxito en las luchas tribales, en la caza, la resistencia a ciertas enfermedades y la capacidad de preservar a la prole de los peligros estuvieron relacionados con la condición física (Van Dalen y Bennet, 1971b). No sorprende, pues, que las tribus primitivas valoraran la capacidad física como una cualidad importante en el hombre. La mayoría de los autores coincide en considerar que en los pueblos primitivos predominaron formas de ejercicio relacionadas con la supervivencia, ya sea directamente a través de la caza o la lucha, o indirectamente a través de los ritos mágico-religiosos, la danza y los juegos (Diem, 1966; Van Dalen y Bennet, 1971b). En las civilizaciones antiguas perduraron estos valores del ejercicio. No obstante, escritos tan antiguos como el de ILON-FU (2.880 a.C.) o los aforismos de Ayur-Veda (1.800 a.C.) ya señalan las virtudes terapéuticas del ejercicio (Legido Arce, 1995).

La ciencia y la actividad física en la Grecia clásica

La ciencia tiene sus orígenes en la Grecia antigua. Los griegos elaboraron una concepción unitaria de la ciencia en la que el objeto de estudio por excelencia fue la naturaleza o *physis*. Tal y como hemos indicado anteriormente, hacia los siglos VI y V a.C. surgió el concepto primordial de *physiologia* como el conjunto de saberes o ciencia cuyo objeto era el estudio y la comprensión de la naturaleza. Las cuatro disciplinas básicas de la *physiologia* fueron: la eidología, la estequiología, la genética y la dinámica.

La primera referencia antigua al valor del ejercicio físico para el mantenimiento de la salud corresponde a esta época y nos ha llegado gracias a la recopilación de 53 escritos breves, cuya autoría no ha podido ser establecida, pero cuyo origen se sitúa en la escuela de Cos. Estos escritos fueron recopilados en Alejandría e integraron el denominado *Corpus Hippocraticum*, primera colección de textos científicos del mundo antiguo. Entre otros temas, los escritos hipocráticos abundan en explicaciones relativas a la actuación filosoficomédica del profesional de la época. Es muy destacable la importancia que se confiere en los textos hipocráticos al ejercicio físico, a la dieta y a los cuidados corporales. El ejercicio físico es considerado como imprescindible para la salud, siendo numerosas las referencias al mismo en los tres tratados: *sobre la dieta, sobre la medicina antigua y aforismos*. Esta concepción higienista de la actividad física será también defendida por Aristóteles y tendrá una influencia que se extenderá hasta nuestros días. La práctica de ejercicio se vincula no sólo a la profesión, sino también a la imagen ante la sociedad, en especial de los médicos, a los que incluso se conmina a la práctica del mismo, en el tratado sobre el médico: «*La prestancia del médico reside en que tenga buen color y sea robusto en su apariencia, de acuerdo con su complexión natural. Pues la mayoría de la gente opina que quienes no tienen su cuerpo en buenas condiciones no se cuidan bien de los ajenos*».

Era tal la importancia que los griegos clásicos confirieron a los ejercicios físicos, que éstos debían ocupar una parte importante en la educación. Frente a la pura concepción militarista del ejercicio que tuvieron los espartanos, para los que la actividad física tenía como objetivo incrementar la fortaleza corporal del soldado, para así mejorar su eficacia en el combate, los griegos atenienses elaboraron una concepción superior de la educación basada en la *areté* (virtud), en la que se conjuntaban armónicamente los valores físicos, inseparables de los valores morales, y la disciplina militar. Fue también mérito de los griegos de la época clásica el desarrollo de las pri-

meras formas de entrenamiento organizado (tetras) y la metodología para el desarrollo de las cualidades físicas (Hegedus, 1984).

Los ejercicios físicos pasan a ser un medio para conseguir un desarrollo simétrico y equilibrado del cuerpo, para resaltar su belleza, tanto en reposo como en movimiento. El desarrollo integral de la personalidad requería el desarrollo equilibrado de las potencialidades del cuerpo a través de los ejercicios y de las potencialidades de la mente a través de la oratoria, la filosofía, la reflexión, etc. (Van Dalen y Bennet, 1971a). Con la progresiva profesionalización de la práctica del atletismo en la cultura ateniense, surgió la figura del *gimnaste*, que eran *paidotribos* o campeones retirados que se especializaron en el entrenamiento del deportista «profesional». Ocasionalmente, algunos *gimnaste* evolucionaron hacia el *médico gimnaste* o *gimnastai*, especializados en la evaluación de la condición física y en la preparación para la competición, a partir de sus conocimientos sobre la dieta, el reposo y el ejercicio para el desarrollo corporal (Van Dalen y Bennet, 1971a). Éstos serían los precursores de los actuales médicos especialistas en medicina deportiva y, en cierta medida, de los fisiólogos del ejercicio.

Los griegos fueron los primeros en dejar constancia de la experimentación con animales. Acmeón de Cretona, un discípulo de Pitágoras que vivió en el siglo V a.C., trató de encontrar leyes generales para todos seres vivientes, para lo cual utilizó la experimentación animal. Su interés primordial fue tratar de explicar la naturaleza de la enfermedad. Define la salud como «la mezcla armónica de todas las cualidades fundamentales de la materia que compone el organismo» y la enfermedad como la rotura de ese equilibrio. Es el primer filósofo que atribuye al cerebro todas las actividades del espíritu.

El idealismo de Platón, con su concepción de que los sentidos proporcionan al hombre una visión irreal del mundo, produjo un estancamiento en el estudio de la naturaleza. Sería Aristóteles quien superaría la concepción de la supremacía de las ideas sobre la observación, volviendo a la experimentación directa. Aristóteles vuelve al mundo de los hechos concretos y, superando las ideas de su maestro Platón, reconoce la superioridad de la observación sistemática de los hechos naturales y provocados por experimentación, frente a la deducción teórica. Aristóteles se enfrentó con los fenómenos naturales de modo global. En su extensa obra deja un inmenso legado de observaciones y descripciones de los más variados fenómenos, siguiendo una sistemática admirable. Algunas de sus teorías sobre la naturaleza, como la generación espontánea de formas de vida primitivas, resistirán más de dos milenios. A Aristóteles se atribuye también la ideología teleológica, que asumía que cada parte del cuerpo está constituida con un propósito determinado y que su función, por lo tanto, puede ser deducida de la estructura.

La ciencia y la actividad física en Roma

La desintegración de la hegemonía griega, tras la muerte de Alejandro Magno, dispersó las fuerzas intelectuales de la Grecia clásica dando lugar a nuevos núcleos de pensamiento. Los romanos supieron aplicar con gran éxito los conocimientos que iban incorporando de los pueblos conquistados, tal y como testifican las colosales construcciones (puentes, acueductos, las vías romanas, etc.) que nos han legado. Fueron unos magníficos gestores y elaboraron un código legislativo que tuvo una gran influencia en los siglos posteriores; no obstante, ni su filosofía ni su arte alcanzaron el nivel de la civilización Griega.

En Alejandría, Herófilo de Caledonia fue el primero en dejar constancia del uso de la disección de cadáveres de modo sistemático. Logró dar un gran impulso a la anatomía, y llegó a entrever una conexión funcional entre el cerebro y los nervios.

Una de las grandes figuras de la ciencia en Roma fue Galeno de Pérgamo, muy influenciado por la obra de Aristóteles. Enlaza el pensamiento aristotélico con la tradición médica que perdurará hasta el Renacimiento. Galeno aplica el método experimental al desciframiento de los fenómenos naturales. Recopiló y expuso críticamente casi toda la medicina griega en 83 textos de atribución segura y otros tantos de dudosa autoría, dos de los cuales merecen mención especial por su relación con el ejercicio físico: *De sanitate tuenda* y el *Tratado de pelota. Galeno, en su tratado sobre el ejercicio físico por medio del juego de pelota*, hace hincapié nuevamente en la importancia que el ejercicio físico tiene en la conservación de la salud, a la vez que defiende la teoría de que esta clase de juegos constituyen la forma de ejercicio más completa para lograr un óptimo beneficio fisicocorporal (Galeno, citado por Álvarez del Palacio y Villa Vicente [1996]). Así pues, en Roma se acrecienta la concepción higienista y militarista del ejercicio, mientras se pierde buena parte

de los atributos educativos que los griegos le habían conferido, pasando a ser fuente de espectáculo y parte fundamental de la formación del soldado. Por ello, los ejercicios se practicaron fuera de la escuela, en el *Campus Martius*.

Es de destacar que la tremenda personalidad de Galeno y la firmeza de sus interpretaciones hizo que su obra fuera seguida por sus discípulos de modo totalmente acrítico, situación que se consolidó con el paso de los siglos. Desmontar su concepción de la naturaleza llevaría una enorme cantidad de esfuerzo a los fisiólogos renacentistas y modernos (Chirino Godoy, 1996).

La ciencia y la actividad física en la Edad Media

La incapacidad de los pueblos bárbaros para administrar el vasto Imperio Romano abocará a la desintegración de éste con la aparición de infinidad de pequeñas comunidades rodeadas de muros o empalizadas para defenderse de los pueblos vecinos. Los pueblos feudales tratan de ser autosuficientes, el comercio casi desaparece y la cultura se refugia en los monasterios. En sus inicios, la Edad Media representó casi una vuelta al estado tribal.

Durante la Edad Media tiene lugar el asentamiento definitivo e inestable de las ideas transmitidas por Galeno. No obstante, el dualismo platónico potenciado por las ideas cristianas lleva a la máxima exaltación del alma y al mayor desprecio de lo corporal y lo terrenal frente a lo espiritual y divino. Carece de interés la formación del cuerpo frente a la formación del alma, por lo que no confieren ningún valor educativo al ejercicio físico.

En la Edad Media, el alma es la fuerza que sustenta la vida y regula las funciones corporales. La enfermedad aparece como consecuencia de disfunciones anímicas, de alteraciones en el estado de gracia, según la concepción cristiana, y, en casos extremos, debida a la posesión diabólica. La mayor parte de los médicos pertenecen a órdenes religiosas o trabajan para las autoridades eclesiásticas. El celo de la «censura eclesiástica» que procuró expurgar toda referencia supuestamente pagana en los textos clásicos, juntó con el menosprecio al cuerpo y a las actividades físicas, con excepción de las relacionadas con la caballería, provocan una auténtica involución y la desaparición del culto al ejercicio físico, que los griegos tan sabiamente profesaron.

La decadencia medieval en Europa contrasta con un notable desarrollo de la medicina hebrea y árabe, con personalidades tan destacadas como Rhazes, Abbas, Avicena, Averroes, Abenozar o Maimónides.

Por lo general, los médicos árabes y hebreos mantuvieron, e incluso mejoraron, algunos aspectos de la medicina galénica, exentos de los prejuicios y salvaguardas introducidas en el pensamiento por el cristianismo. La escuela de traductores de Toledo, multirracial, tolerante y muy prolífica, jugó un papel decisivo en la transferencia del saber clásico y árabe a los pueblos cristianos, esparciendo las semillas de la eclosión renacentista.

No obstante, a partir del siglo x aparecen las primeras escuelas laicas de medicina: el *Colegium Hipocraticum* en Salerno, Chartres y Montpellier.

Nace en Montpellier la que sería la primera facultad de medicina de Europa, donde impartió docencia el médico catalán Arnau de Vilanova. Son notables las referencias de Arnau de Vilanova al valor profiláctico del ejercicio físico moderado. Se repite la idea galénica de que la práctica de ejercicio prolonga la vida. Según Arnau de Vilanova, el ejercicio debía ser de intensidad moderada y uniforme; no obstante, la valoración de la intensidad del esfuerzo es similar a la que practicaron los médicos clásicos, o sea, en función de la percepción subjetiva del grado de fatiga.

La ciencia y la actividad física en el Renacimiento

Durante el renacimiento se reaviva el interés por todo lo relacionado con el hombre y con la naturaleza. La invención de la imprenta posibilitó la expansión de los textos clásicos y una nueva inquietud va invadiendo los centros del saber y la cultura de Europa: el amor por los clásicos. Todo lo referido al cuerpo humano y su desarrollo se aborda desde la perspectiva de saberes clásicos como la filosofía y, especialmente, la medicina. Las cuatro disciplinas básicas que integraban, desde los presocráticos, el conocimiento científico (la eidología o anatomía descriptiva, la estequilogía, la antropogenia y la dinámica) se van dividiendo en nuevas disciplinas. La dinámica se escinde en la fisiología, que pasa a ser entendida como el conocimiento de la actividad del cuerpo viviente, y la psicología, doctrina que trata de la vida anímica del hombre. A partir de Fernel (*Universa medicina*, 1554, citado por Laín Entralgo, 1978) el término «fisiología» perderá su significado general (estudio de la naturaleza en su globalidad), para significar exclusivamente el *estudio científico de los movimientos y las funciones de los*

seres vivientes. Se trata de una fisiología en la que la estructura determina la función y, por lo tanto, la función puede ser deducida matemáticamente a partir de la estructura y de sus movimientos.

El conocimiento científico del hombre incluirá desde el siglo XVI una psicología nueva, y cada vez con más explicitud exigirá la constitución de una nueva disciplina intelectual a la par científica y filosófica, la antropología. Según Laín Entralgo, debe verse en Luis Vives (1492-1540) al fundador de la psicología moderna: «*un saber acerca de la vida anímica más atento a la descripción de las manifestaciones de ella —voluntad, inteligencia, memoria, y precisamente por este orden voluntarista— que a la especulación metafísica acerca de lo que el alma sea*».

El ejercicio físico recobra la importancia que tuvo en la Grecia clásica, pero bajo una perspectiva, más que nada, higienista. Esto es así, hasta el extremo que una parte relevante del saber médico será la relacionada con los ejercicios corporales. No sorprende, pues, que casi todos los escritos relativos al ejercicio producidos durante el renacimiento fueran redactados por insignes médicos humanistas, entre los que destacaron: *El vergel de sanidad* (1542), de Luis Lobera de Ávila; *El Libro del ejercicio corporal y de sus provechos* (1553), de Cristóbal Méndez; *El aviso de sanidad* (1569), de Francisco Núñez de Coria; *De arte gimnástica* (1569), del médico italiano Jeronnimus Mercurialis, y *La conservación de la salud del cuerpo y del alma* (1597), de Blas Álvarez de Miraval (citados por Álvarez del Palacio, 1994). De las obras mencionadas merece especial atención, en el ámbito de la Educación Física, la de Jeronnimus Mercurialis, por su carácter menos higienista y más centrado en el propio ejercicio físico.

No obstante, los griegos confirieron un mayor valor al ejercicio que los humanistas del Renacimiento, que observaron el ejercicio desde una perspectiva más higienista. En la antigua Grecia el ejercicio fue mucho más, constituyó la vía para la adquisición y conservación de la salud, contribuyendo a la formación integral de la persona, a su equilibrio mental, a la integración social y al desarrollo de sus principios ético-morales (Álvarez del Palacio y Villa Vicente, 1996).

Hasta esta época todos los razonamientos científicos se articulan en torno a Dios, el alma y el cosmos. Frente al escolasticismo, inmovilismo y rigidez de las universidades, surge la incipiente ciencia moderna sustentada en dos pilares fundamentales: el sabio solitario (Leonardo da Vinci, Copérnico, Erasmo, Paracelso, Vives, Cardano, Serveto, Galileo, Harvey, Descartes...) y la Academia o institución que promueve la investigación y en la que los sabios se reúnen, no para enseñar a los que saben poco, como en las aulas universitarias sucede, sino para comunicarse entre sí sus descubrimientos. Tras las academias puramente humanistas del renacimiento surgen la *Academia dei Lincei* (Roma), la *Royal Society* (Lodres) y la *Académie des Sciences* (París). No obstante, aún durante el renacimiento la influencia del cristianismo es marcada. La actitud que preside el razonamiento científico, según Laín Entralgo, es la siguiente: «*Desde su potencia y ciencia infinitas, Dios ha querido hablar y habla al hombre a través de dos libros, uno de palabras, la Sagrada Escritura, otro de obras, la Naturaleza creada; y puesto que Dios es verdad suprema y fuente de toda verdad, ambos libros deben hallarse por necesidad en perfecta concordancia*». *De ahí el famoso proceso a Galileo.*

La observación de los fenómenos naturales como vía hacia el conocimiento recobra la relevancia que alcanzó con los clásicos. La medición y el experimento, frente a la mera observación, constituirán a partir de esta época el principal camino para la obtención del conocimiento. El hombre de ciencia aspira a un conocimiento del cosmos en el cual tanto las cualidades de las cosas (color, sabor, propiedades diversas), como los cambios que en ellas se produzcan, sean entendidos de un modo a la vez cuantitativo, estructural y matemático. Este paradigma mecanicista tiene su origen en Italia y se continúa fundamentalmente en Francia, Inglaterra y Alemania.

Ya Leonardo da Vinci, la figura más importante del siglo XV, establecería que «la mecánica es el paraiso de las ciencias matemáticas». El mismo tipo de discurso aflora de las palabras de Galileo: «El magno libro del universo está escrito en legua matemática» (da Vinci y Galileo, citados por Laín Entralgo [1978]). Leonardo da Vinci (1452-1519) es el genuino precursor de la ciencia moderna; partiendo de hechos aislados o de situaciones particulares, es capaz de inducir teorías, y después demostrarlas experimentalmente; por ejemplo: lleva a cabo autopsias para conocer las causas de la muerte. La interrelación entre forma y función es su obsesión permanente. Por todo ello, puede considerársele como el precursor de la moderna anatomía funcional.

Andrés Vesalio (1514-1564) continuó, en la primera mitad del siglo XVI el camino emprendido por Leonardo da Vinci. Vesalio disecó gran número de cadáveres con fines didácticos y de investigación, discutió las interpretaciones de Galeno y estableció la supremacía de la observación sobre las interpretaciones filosóficas. Refiriéndose a Galeno, escribió *¡Tú, Galeno, que te dejaste engañar por tus monas!*, pues Galeno no realizó autopsias en seres humanos, tan sólo extendió las observaciones obtenidas a partir de la disección de simios al ser humano. En 1543 se publicó la obra más remarcable de Vesalio, titulada *Fabrica Humani Corporis* (la estructura del cuerpo humano), en la que aborda la descripción anatómica como si de la estructura arquitectónica de un edificio o una «máquina» se tratara. Además, Vesalio intenta en ocasiones explicar la función de los órganos; no obstante, sus explicaciones de la fisiología visceral todavía están profundamente imbuidas en el galenismo.

La vida aún no es reconocida como el resultado de un equilibrio dinámico entre estructuras que luchan por mantener su nivel de organización. El pensamiento de la época tan sólo reconoce la existencia de órganos que funcionan, y el papel de la fisiología consiste en reconocer sus engranajes y su disposición, equiparando el cuerpo humano a una máquina.

Aparece la eminente figura alemana Paracelso (*Teophrastus Bombast von Hohenheim* 1493-1541), cuyo mérito estribó en recopilar y adaptar las teorías químicas de la vida existentes hasta entonces. No sólo descartó la teoría del origen cardíaco del calor, estableciendo el origen del calor en la alimentación, sino que, frente a las teorías mecanicistas, propuso su teoría panvitalista, por la que el conocimiento del mundo tiene que basarse en el estudio de las transformaciones cualitativas de las cosas naturales (concepto ancestral de reacción química) y, por tanto, en la alquimia.

Posteriormente, con Boyle (1608-1679) la alquimia de Paracelso se transforma en la química, al elaborar el concepto de elemento químico. Willis (1622-1675) descubrió que la motricidad voluntaria depende de la corteza cerebral, base de partida para los estudios efectuados en los siglos posteriores sobre la coordinación del movimiento voluntario.

Durante el renacimiento sólo son accesibles al análisis aquellos aspectos que pueden ser estudiados a través de la aplicación de las leyes del movimiento al cuerpo humano o de los animales. De ahí que las primeras explicaciones que trataron de esclarecer el funcionamiento de los procesos observados fueron incorrectas, o tan vagas que sólo pueden ser consideradas meras especulaciones. Por ejemplo, en 1574 *Hieronymus Fabricius* sugirió que la capacidad contráctil del músculo residía en sus tendones y no en el vientre muscular. Hasta 1660, en que el holandés Antony van Leeuwenhoek (1632-1723) introdujo el microscopio, no se identificaron las fibras musculares. El procedimiento por el cual las fibras musculares eran capaces de acortarse y generar tensión siguió siendo un misterio hasta la segunda mitad del siglo XX (Wilmore y Costill, 1994).

En 1628 William Harvey (1578-1657) publica su *Exercitatium Anatomica de Motu Cordis et Sanguinis*, en la que describe el movimiento del corazón y de la sangre por el aparato circulatorio. Los precedentes de la obra de Harvey se encuentran en el trabajo del teólogo aragonés Miguel Servet, quien había descrito la circulación pulmonar. Con Harvey finalizó el concepto galénico de que las arterias contenían neuma (aire) y las venas sangre. A lo largo del siglo XVII, y bajo la poderosa influencia del desarrollo de la física y de la química, se produce la aparición de los primeros aparatos destinados a la medida de las funciones corporales: es el resultado del desarrollo de la iatromecánica y la iatrofísica. Aparecen en esta época instrumentos como el pulsímetro, inventado por Santorio (1561-1636), quien además usó profusamente el termómetro y la balanza para el control del peso.

La ciencia y la actividad física en la Ilustración

Aunque ya durante el Renacimiento va tomando cuerpo la idea del *progreso indefinido*, éste va a presidir el pensamiento del científico ilustrado. Según Laín Entralgo (1978), mediante su voluntad y razón propias, el hombre ilustrado se siente capaz de avanzar indefinidamente en el gobierno técnico del mundo y de su propia vida.

Frente a los excesos del mecanicismo, surge el *animismo*, que considera el alma como principio de acción de todos los procesos vitales. Este movimiento filosófico-científico se continuará en el siglo XVIII con el *vitalismo*. Ni animismo ni vitalismo contribuyeron al fortalecimiento del conocimiento científico, más bien representaron una actitud filosófica, alternativa al mecanicismo. No obstante, la concepción vitalista contribuyó a separar los seres vivos,

poseedores de la *fuerza vital*, del resto de los objetos naturales del entorno. Los vitalistas sustituyen la concepción animista del poder del alma localizada en el corazón como rector de todos los procesos vitales, por la *fuerza vital*, una cualidad particular de la materia que constituye los seres vivos, presente en todo el cuerpo, incluidos los músculos. Por lo tanto, la contracción muscular, para los vitalistas es consecuencia de la fuerza vital del músculo.

Los avances de la física con Newton y de la química, especialmente a partir de los estudios de Lavoisier, van cambiando el concepto de la naturaleza. Ésta ya no es un sustrato homogéneo divisible hasta el infinito, sino que se compone de un número limitado de partículas aisladas, separadas entre sí y no idénticas. El afán enciclopedista de la época lleva a la búsqueda continua de nuevas sustancias para definir sus propiedades y clasificarlas. Se descubren nuevos elementos químicos, entre ellos el oxígeno (Scheele y Priestley), se desarrolla la botánica y la zoología, apareciendo los primeros esbozos de las teorías evolucionistas. El desarrollo de la química sienta el punto de partida para un nuevo impulso en el desarrollo científico de la fisiología.

De especial trascendencia para el ámbito actual de la fisiología del ejercicio fueron las aportaciones de Marcello Malpighi (1628-1694), quien descubrió la vesícula pulmonar (alvéolos) y que el aire no entra en contacto inmediato con la sangre. También describió los capilares pulmonares y los hematíes, clausurando la teoría galénica de que la sangre era una mezcla homogénea de humores. Especial mención, por las repercusiones de sus descubrimientos en nuestro ámbito, merece el francés Lavoisier (1743-1794). Este investigador, tan reivindicado por fisiólogos como por químicos, descubrió que el oxígeno inspirado se combina con el carbono produciendo ácido carbónico y agua. Asimismo comparó la respiración a la combustión y estableció relaciones entre respiración y digestión, ya que no concibe fuego sin consumo de combustible: «*Si los animales no repusiesen con los alimentos lo que pierden con la respiración, muy pronto faltaría el aceite al candil y el animal perecería como se apaga la llama cuando falta el combustible*». Para Lavoisier el animal se analiza, pues, en términos de máquina, aunque no funcionando únicamente por la forma y el movimiento, tal y como defendieron los mecanicistas del renacimiento. Para Lavoisier el ser vivo no constituye simplemente una asociación de órganos que funcionan, sino un conjunto de funciones integradas que responden cada una de ellas a exigencias precisas. Este concepto es muy importante, pues guarda gran similitud con la concepción actual de la fisiología.

También destacaron en esta época el holandés Hermann Boerhaave (1668-1738) y el suizo Albrecht von Haller (1708-1777), discípulo del anterior. Boerhave recopiló y sistematizó el conocimiento fisiológico de la época en su obra *Institutiones Medicae*, que fue traducida a varios idiomas, llevando el nombre fisiología su traducción al alemán. Es el primer libro de texto de Fisiología que merece tal nombre y fue utilizado ampliamente en España durante el siglo XVIII. Abrecht von Haller llevó a cabo numerosos estudios de irritabilidad, sensibilidad y relación entre estímulo y reacción. Por lo tanto, establece las bases para los estudios de tiempo de reacción tan importantes en el rendimiento deportivo. Introdujo un tipo de experimentación sistemática de los fenómenos que le ha valido ser reconocido como el precursor de la fisiología experimental, destacando entre sus numerosísimas obras los *Elementa Physiologiae Corporis Humani* (ocho volúmenes, publicados entre 1757 y 1776).

Otra de las grandes figuras que nos dio el siglo de las luces fue el italiano Lázaro Spallanzani (1729-1799), sacerdote y profesor en Módena y en Pavía, a quien se atribuyó el aserto: *La voz de la naturaleza debe prevalecer sobre la del filósofo*. Spallanzani fue un gran científico, basó sus descubrimientos en la observación y descripción metódica de los hechos y en la manipulación experimental de la naturaleza. Spallanzani pudo demostrar que la combustión descrita con anterioridad por Lavoisier no se producía sólo, como éste pensó, en los pulmones, sino que tenía lugar en todos los tejidos del organismo. También realizó numerosas aportaciones en fisiología de la circulación, de la reproducción y de la digestión.

La electricidad fue entrevista como agente físico nuevo en el siglo XVII, pero no estudiada con suficiente rigor científico hasta bien entrado el siglo XVIII. Se evidenciaron los efectos biológicos de las descargas eléctricas. La electrofisiología es iniciada por Luigi Galvani (1737-1798), quien fue capaz de demostrar la existencia de corrientes eléctricas en los seres vivos, en especial en el músculo. Los experimentos de Galvani suscitaron el interés del gran naturalista W. von Humboldt, quien realizó un estudio sobre la actividad eléctrica de los nervios y músculos. Se sientan por tanto las bases para los

avances en electrofisiología que tendrán lugar durante los siglos XIX y XX, que fructificarán en el desarrollo de técnicas como la electromiografía, la electroneurografía y la electroestimulación, muy utilizadas en el estudio de las adaptaciones al entrenamiento de fuerza, en el estudio de la fatiga y, en general, en el estudio del control nervioso del movimiento. Por lo tanto, todas de gran interés en el contexto de la fisiología del ejercicio.

La ciencia en el siglo XIX

Durante el siglo XIX tiene lugar un importante desarrollo del conocimiento fisiológico, gracias sobre todo a la aplicación de los incesantes avances que se van produciendo en la física y la química. Se desarrolla la teoría cinética de los gases, mejora el conocimiento de la electricidad, se establece la teoría atómica de la materia, etc., avances todos ellos de enorme repercusión en el campo de la biología. Además, la progresiva sustitución de las ideas vitalistas de los siglos XVII y XVIII por el *positivismo* de Comte, libera definitivamente a la fisiología del lastre metafísico.

Los remarcables avances científicos del siglo XIX resultan de una conjunción de hechos que influyen decisivamente en la forma en que los científicos analizan la realidad; cambian los procedimientos de observación directa, las técnicas de medida y los procedimientos experimentales. La observación directa del objeto científicamente estudiado alcanza mayor perfección: desarrollo de la fotografía, perfeccionamiento de la microscopía, del telescopio, desarrollo de la espectroscopia, mejora del análisis químico, desarrollo de los instrumentos de registro gráfico (electrocardiógrafo, termógrafo ...) y descubrimiento de los rayos X.

La mensuración (tan importante en la evaluación de la condición física), antes reducida al mero recuento, a la medición geométrica (volúmenes, superficies, longitudes, etc.), a la termometría y a la pesada, se complementa con la posibilidad de medición de la intensidad de la corriente eléctrica y de los campos magnéticos. Además, serán objeto de medición las distintas formas de la energía (eléctrica, mecánica, térmica, magnética, lumínica, etc.), promoviendo el desarrollo de una actitud mensurativa en la comunidad científica, tan brillantemente consignada como *mens mensurans*, por Laín Entralgo (1978).

Hasta Claude Bernard el experimentador provoca artificialmente un fenómeno y lo describe tal como se le presenta. Bernard analizará por vía experimental los distintos momentos que integran ese fenómeno y su causa determinante, suprimiéndolos o alterándolos uno a uno y observando exactamente el resultado de su intervención.

La interpretación de los resultados experimentales tiende a atenerse a las leyes de la física y de la química, aunque en ocasiones se aprecian reminiscencias vitalistas. Especialmente significativo fue el enorme auge que alcanzan las sociedades científicas, la creación de institutos de investigación —como el instituto de fisiología de Friburgo, creado por Schultze— y la aparición de las revistas científicas para la publicación de los resultados de la investigación, como las conocemos actualmente.

El *fibrilarismo vitalista*, que consideraba que el cuerpo de los seres vivos estaba formado por «elementos fibrilares» (fibras visibles macroscópica y microscópicamente, junto con las fibras elementales invisibles), que a diferencia de la materia inerte, estaban provistos de una cualidad otorgada por el creador, la «fuerza vital», es reemplazado por la teoría celular desarrollada por Schleiden (1804-1881) y Schwann (1810-1882). La teoría celular marca una nueva concepción del ser humano, como integrado por células, entendiendo éstas como estructuras capaces de tener vida aislada y, en ocasiones, de reproducirse a sí mismas. Adquiere carácter definitivo el principio de Rudolph Virchow *omnis cellula e cellula* (toda célula procede de otra célula), cerrando cualquier opción a las teorías de generación espontánea de vida de siglos anteriores. Con los estudios de Francis Galton (1822-1911, aplicación de la estadística matemática al estudio de la herencia), Gregor Mendel (1822-1884, autor de la leyes que llevan su nombre) y August Weismann (1834-1914, descubrió que los cromosomas son los portadores de los caracteres hereditarios), se sientan las bases de una nueva ciencia: la genética. Charles Darwin (1809-1882) propone la teoría de la evolución de las especies. Con Pasteur (1822-1895) nace una nueva ciencia: la microbiología.

En fisiología destacaron François Magendie (1783-1855) y Claude Bernard (1813-1878) en Francia, Johannes Müller (1801-1858), Justus von Liebig (1803-1873), Carl Ludwig (1836-1895) y Eduard Pflüger en Alemania, Sir Michael Foster (1836-1907) en Inglaterra e I. P. Pavlov (1849-1936) en Rusia. Eduard Pflüger localiza la respiración en el interior de las células. Claude Benard reconoce la célula como unidad funcional, naciendo así la

fisiología celular, que tanto avanzará a lo largo del siglo XX, centrada el estudio del funcionamiento de las células. Claude Bernard propuso el concepto acerca de la sangre y fluidos corporales como «medio interno» en el cual las células llevan a cabo sus actividades, plenamente vigente en la actualidad. En definitiva, sus aportaciones colocan a la fisiología en una nueva era que conduce hasta nuestros días.

Johannes Müller contribuyó al enriquecimiento del conocimiento fisiológico desarrollando la ley de las energías nerviosas específicas en la percepción sensorial. Fue capaz de medir la velocidad de conducción nerviosa, y sentó las bases para el destierro de la influencia vitalista en el campo de neurofisiología. Helmholtz, discípulo de Müller, estudió en profundidad la fisiología de la visión (inventó el oftalmoscopio) y de la audición. Du Bois-Reymond, también discípulo de Müller, inventó aparatos de medición de fenómenos eléctricos orgánicos, que aplicó con éxito a los estudios de fisiología neuromuscular. Desarrolló el concepto de bioelectricidad, demostrando su existencia en los nervios y músculos. Asimismo, fue el primer fisiólogo en determinar la presencia de ácido láctico en la musculatura.

En 1847 Carl Ludwig inventa el quimógrafo, que utiliza para obtener registros de presión arterial y de contracciones musculares. Propone descomponer el cuerpo animal en sus partes constituyentes, midiendo el valor absoluto de los rendimientos por medio de aparatos más o menos complicados. Carl Ludwig fue, además, un gran impulsor de la experimentación *in vitro*. La experimentación sistemática lleva de inmediato a la diversificación de los aparatos a emplear, y a la especialización de los fisiólogos como consecuencia de la acumulación de conocimientos. Carl Ludwig hizo importantes contribuciones en el campo de la fisiología circulatoria y renal. Escribió el primer tratado de fisiología con bases físicas y no puramente anatómicas. Asimismo, en 1869 funda en Leipzig el *Neue Physiologische Anstalt*, La Meca de la fisiología en el último tercio del siglo XIX, que servirá como modelo para los institutos de investigación en fisiología que proliferarán por todo el mundo. No obstante, la influencia de la escuela alemana llega tardíamente a España a través de las obras de García Valdecasas y de Domínguez, ambos formados en Alemania.

En España, sobresalió el Nobel Ramón y Cajal (1852-1934), quien demostró que, contrariamente a lo que se creía con anterioridad, el tejido nervioso no es una estructura continua, sino que está formado por células, las neuronas, que no se relacionan entre sí por continuidad, sino por mera contigüidad. Young ha comparado la importancia de la teoría neuronal de Cajal para la moderna neurofisiología con la de la teoría atómica para el desarrollo de la química. La importancia de la obra de Ramón y Cajal va más allá de sus descubrimientos científicos, ya que tuvo y sigue teniendo una gran repercusión en la vida científica de nuestro país. Especial mención merece Fernando de Castro, discípulo de Cajal, que realizó una descripción histológica del cuerpo carotídeo que ha perdurado hasta nuestros días. Además, Fernando de Castro fue el primer científico en atribuir correctamente una función sensorial al cuerpo carotídeo (Lahiri, 2000). Después de la Guerra Civil centró sus esfuerzos en el estudio de los barorreceptores carotídeos. Muy buenos fisiólogos españoles han continuado esta tradición de excelencia en el estudio de los quimiorreceptores y sus mecanismos funcionales, como el grupo del doctor C. González en Valladolid y del doctor López Barneo en Sevilla.

Una incipiente bioquímica inicia sus pasos durante el siglo XIX, gracias al tremendo desarrollo que experimentó la química. De gran importancia fue la creación de la *teoría atómica de la materia* por John Dalton, que completó las leyes estequiométricas de la combinación con su *Ley de las proporciones múltiples*. Berzelius, máxima autoridad de la química en la primera mitad del siglo XIX, identificó varios elementos químicos, contribuyó de forma decisiva a separar la química orgánica de la inorgánica y creó la nomenclatura química que con pocos cambios aún perdura. Mendeleieff propuso la famosa tabla periódica de los elementos. Emil Fischer describe los componentes elementales que forman el organismo y consigue la síntesis de los hidratos de carbono, de compuestos púricos y de aminoácidos. Fr. Whöhler consiguió la síntesis química de urea (un compuesto orgánico), a partir de cianato amónico (un compuesto inorgánico), clausurando la creencia hasta entonces general de que los compuestos orgánicos son «especiales» por las propiedades que les confiere la «fuerza vital» y por lo tanto no pueden ser sintetizados en el laboratorio. En 1887, Hertz demostró la existencia de la «energía radiante» (ondas hertzianas). Un poco más tarde, Becquerel descubrió la radiactividad, Röntgen los rayos X y los esposos Curie el elemento químico radio. En 1905 Albert Einstein publicó su Teoría de la Relatividad, lo que pone punto final a la física clásica. También

destacaron por su contribución al avance de la física teórica y atómica Rutherford, Max Plank y Bohr.

La termodinámica y la termofísica experimentaron importantes avances, especialmente en el último tercio del siglo XIX, gracias a las contribuciones de JW Gibbs. En 1903 RA Zsigmondy inventó el ultramicroscopio, que revolucionará el conocimiento de la estructura celular y tisular durante el siglo XX.

Durante el siglo XIX se producen numerosísimos avances técnicos que van a influir decisivamente en la sociedad y a incrementar notablemente el poder investigador del ser humano; como consecuencia los avances científicos crecerán de forma exponencial hasta nuestros días. La mayoría de los avances científicos tienen su origen en las universidades y en los institutos de investigación anejos. No obstante, la continua demanda de saberes tecnificables por parte de la industria acaba desbordando a la universidad, apareciendo las primeras instituciones oficiales y privadas de investigación (Laín Entralgo, 1978).

La ciencia en el siglo XX

La carrera imparable iniciada por la ciencia en el siglo XIX continúa durante el siglo XX, manifestándose en una parcelación cada vez mayor del saber científico. Han continuado los avances en física, especialmente en física nuclear, química (especialmente la química orgánica y el análisis químico), fisicoquímica, bioquímica, génetica, ingeniería genética, genómica, proteómica, etc., facilitados en gran medida por el desarrollo de la electrónica y la tremenda expansión de la informática. Todo ello ha fructificado en la generación de una inmensa cantidad de nuevos conocimientos tanto en fisiología como en medicina. Como consecuencia se multiplican las especialidades y tiene lugar una tecnificación, cada vez mayor, del proceso experimental, lo que obliga a la expansión de los grupos experimentales e incluso a la especialización de sus componentes en distintas tareas. A raíz de ello, prácticamente, se extingue la figura del investigador solitario. El desarrollo continuo de nuevos y más sofisticados instrumentos y la profusión de nuevas técnicas (electroforesis, inmunoelectroforesis, enzimología, cromatografía, inmunohistoquímica, inmunoquímica analítica, radioquímica, PCR, hibridación *in situ*, *patch clamp*, difracción de rayos X, difracción de electrones, resonancia magnética nuclear, tomografía axial computarizada, tomografía de emisión de positrones, ingeniería genética, bioinformática, etc.), con la ayuda fundamental de la electrónica y la informática, han incrementado millones de veces la velocidad máxima de proceso, posibilitando estudios cada vez más complejos acerca de la naturaleza humana. Sin duda la aportación científica más importante para el avance del conocimiento fisiológico de todo el siglo XX ha sido el descubrimiento de la estructura del ADN y el código genético por Watson y Crik. Esto ha permitido crear animales modificados genéticamente para estudiar la función de proteínas o partes de proteínas, ya sea en seres vivos o en tejidos o células aisladas. Se han creado animales transgénicos que son ahora analizados por los fisiólogos, lo que ha dado lugar a una nueva disciplina dentro de la fisiología que se ha denominado genómica funcional o «functional genomics» y ha significado un renacer de la fisiología regulatoria e integrativa.

La historia de la fisiología del ejercicio

La aparición de la fisiología del ejercicio como disciplina científica obedece a tres causas principales. Primero, a la necesidad, impulsada por los militares, de mejorar el conocimiento de los factores que pueden determinar el rendimiento físico de los soldados en campaña. Segundo, al fenómeno deportivo, que de elitista y exclusivo de las clases burguesas va extendiéndose al resto de la población a lo largo del siglo XX. Además, la identificación del orgullo nacional con los éxitos alcanzados en el terreno deportivo despierta el interés por buscar nuevos procedimientos de entrenamiento, de selección de talentos, etc., que permitan aumentar el rendimiento de los atletas que representan a cada país en las competiciones internacionales. Tercero, al avance científico en el ámbito de la fisiología regulatoria e integrativa, que pronto descubre que el ejercicio constituye un excelente modelo para poner de manifiesto los distintos mecanismos homeostáticos (Rowell y cols., 1996).

Analizaremos, a continuación, los principales acontecimientos que desembocaron en la aparición de fisiología del ejercicio como una especialidad científica de la fisiología. La fisiología del ejercicio es una disciplina relativamente joven. Antes del siglo XIX, uno de los objetivos más importantes de la fisiología era conseguir información con relevancia clínica, mientras que la respuesta orgánica y sistémica al ejercicio casi no recibió atención, a pesar de que los efectos beneficiosos de la práctica regular de ejercicio

físico eran reconocidos desde la antigua Grecia. No obstante, entre el siglo XV y el siglo XIX se produjeron los avances científicos que sentaron las bases para la aparición de la fisiología del ejercicio.

La fisiología del ejercicio, como ente diferenciado de la fisiología, tiene sus comienzos a principios del siglo XX en Copenhague, donde se creó el primer laboratorio de teoría de la educación física del mundo, dirigido por el doctor Johannes Lindhard. A este último se le ha considerado el iniciador e impulsor de la fisiología del ejercicio moderna. Ya en 1908 Lindhard escribió en una carta dirigida a August Krogh que tenía dudas acerca de los postulados de la gimnasia sueca, que consideraba especulativos. Posteriormente, junto con August Krogh inició una serie de estudios que le permitieron demostrar que ni la postura «óptima» ni la ejecución tan rígida de los movimientos, facilitaba la respiración, contrariamente a lo que postulaban los defensores de la gimnasia sueca. Lindhard y August Krogh realizaron numerosos trabajos acerca de la respuesta ventilatoria y circulatoria al esfuerzo, la contracción muscular y la termorregulación durante el ejercicio.

Las causas que facilitaron la aparición de la fisiología del ejercicio

Varios acontecimientos contribuyeron al nacimiento de la fisiología del ejercicio y, posteriormente, de la evaluación de la condición física, parte de los cuales vamos a reseñar a continuación:

- *El interés de los fisiólogos por desvelar las claves del metabolismo energético.* A principios del siglo XX la bioquímica estaba es sus albores y el conocimiento del metabolismo energético era muy pobre. Sirva de ejemplo las palabras que a este hecho dedicó Lagrange: «(...) *últimamente la combustión vital (metabolismo energético) se ha tornado muy complicada; podríamos afirmar que es algo confuso y que es difícil facilitar en pocas palabras un resumen conciso. Es un capítulo de la fisiología que está siendo escrito y no podemos formular en este momento nuestras conclusiones*» (LaGrange 1889, citado por Wilmore y Costill, 1999). Para poder avanzar en el estudio del metabolismo energético durante el ejercicio era necesario disponer de preparaciones en las que se pudiera variar con facilidad la demanda de energía y por tanto la actividad metabólica. Una de las preparaciones más usadas con este fin fue el músculo de rana aislado *in situ* o *in vitro*, sometido a estimulación eléctrica.
- *El reconocimiento de los valores higiénicos (para la salud) y pedagógicos del ejercicio físico*, que da lugar a la incorporación de clases de gimnasia y educación física en el ámbito escolar. Este fenómeno se inicia a principios del siglo XIX en Europa y a finales del siglo XIX en Estados Unidos. Durante el siglo XIX se fundan la mayoría de los centros de formación de instructores y profesores de educación física en los países europeos.
- La elección del *ejercicio físico como modelo para el estudio de la fisiología regulatoria e integrativa;* es decir, aquella que estudia simultáneamente la respuesta de varios órganos y sistemas, para tratar de establecer cómo se relacionan las respuestas de las partes con el todo (máximo objetivo de la fisiología, según Claude Bernard).
- Los *avances técnicos* que facilitan el desarrollo de los primeros ergómetros y espirómetros, lo que hace posible la cuantificación exacta del consumo de oxígeno durante el ejercicio.
- La *demanda de conocimientos acerca de la respuesta del cuerpo humano sometido a situaciones extremas.* La necesidad de conocer cuáles son los factores que determinan la capacidad del ser humano para afrontar expediciones a las zonas polares, los desiertos, la alta montaña, etcétera.
- El progresivo reconocimiento del *valor diagnóstico de los test de esfuerzo* en medicina y la demanda continua de nuevos procedimientos para el estudio de la función respiratoria y cardiovascular. Así ocurrió con los test para la evaluación de la función respiratoria exigidos por la cirugía torácica o la colapsoterapia, o con los test de esfuerzo cardiológicos basados en la electrocardiografía. Muchos de estos desarrollos fueron utilizados posteriormente en el estudio de deportistas. Así, basándose muchas veces en los resultados obtenidos en las pruebas de esfuerzo, la fisiología y fisiopatología general de los aparatos respiratorio y circulatorio experimentaron un gran auge.
- El *interés militar*, especialmente en Estados Unidos a raíz de las guerras mundiales, después debido a la «Guerra fría» y a la carrera espacial, por determinar los límites del rendimiento humano en las más diversas condicio-

nes (calor, frío, altura, deshidratación, inmersión, ingravidez, etc.). En la década de los cincuenta tiene lugar la publicación en Estados Unidos del artículo *Muscular fitness and health* (1953), de Kraus y Hirshland (ver Devis y Peiró, 1992), que demostró que los niveles de condición física de los niños americanos era inferior al de los niños europeos. Como consecuencia se desarrollan las primeras baterías de test de condición física para niños, como el *Youth Fitness Test* (1959), concebido por la alianza americana para la salud, la educación física, la recreación y la danza (AAHPERD). Además, se produjo un gran interés por los aspectos de la condición física relacionados con el rendimiento y una gran expansión de los laboratorios de fisiología del ejercicio, al tiempo que aumentaron las universidades que incorporaron licenciaturas, masters y estudios de tercer ciclo en lo que denominaron «Sports Sciences». Este interés por la condición física y el rendimiento físico promovió, aún más, el avance de la fisiología del ejercicio, de la biomecánica y de las técnicas de evaluación de la condición física.

- *La progresiva importancia que va cobrando el deporte como fenómeno social, económico y político, especialmente tras la olimpiada de Berlín.*

Consecución de los conocimientos básicos

La evolución de los conocimientos fisiológicos en fisiología muscular, respiratoria y circulatoria a lo largo de los siglos XVI-XIX sentó las bases para el posterior desarrollo de una incipiente fisiología del ejercicio a principios del siglo XX. Entre los hechos más relevantes, destacamos (Déjours, 1963):

1. *Conocimiento del proceso de la ventilación pulmonar,* al que contribuyeron, especialmente, Vesalio, Hooke, Borelli, Boyle, Haller y Hamberger. Los griegos de época clásica ya reconocían la estrecha relación entre la respiración y el mantenimiento de la vida, pero desconocían completamente qué era un gas. Además, la finalidad del proceso respiratorio no será completamente desvelada hasta los estudios de Lavoisier en el siglo XVIII (Fig. 1.1).
2. *Demostración de la similitud entre la combustión y la respiración,* estableciéndose correctamente que durante la inspiración se capta oxígeno que es transportado hasta los tejidos para la oxidación de substratos energéticos y que durante la espiración se elimina el dióxido de carbono que ha generado la combustión. Contribuyeron decisivamente al desarrollo de estos conceptos Boyle, Lower, Mayow, Black, Priestley, Sheele, Stahl, Hales, etcétera. Pero, sin duda, los descubrimientos más importantes correspondieron a Lavoisier.
3. *Constatación de que el metabolismo oxidativo y, por lo tanto, el calor corporal no proviene de los pulmones, como creyó Lavoisier, sino que tiene lugar en las células.* Asimismo se demuestra que la circulación de la sangre asegura el transporte de oxígeno y anhídrido carbónico entre los tejidos, así como que la sangre es capaz de fijar cantidades considerables de



Figura 1.1. *Claude Bernard (1813-1878) rodeado por sus alumnos en una sesión experimental.*

oxígeno y dióxido de carbono (Lavoisier, Berthelot, Magnus, Liebig, Meyer, Zuntz, Ludwig y Pflüger).

4. *Demostración por Lavoisier de que el consumo de oxígeno aumenta con la actividad muscular en los seres humanos.*
5. *Demostración de que el consumo de oxígeno está determinado por la demanda energética* y es independiente de la concentración de oxígeno en el aire inspirado (Paul Bert).
6. *Descubrimiento de la hemoglobina* y de su capacidad para oxigenarse, así como de las leyes que gobiernan el intercambio gaseoso (Edwards, Magnus, Hope-Seyler, Haldane, Barcroft, Henderson y August Krogh).
7. Adquisición del conocimiento acerca del *funcionamiento y regulación coordinada de los aparatos respiratorio y circulatorio,* según las necesidades de recambio gaseoso del organismo (Mayow, Edwards, Dulong y Despres).

Avance en el conocimiento de la función respiratoria y desarrollo de las primeras pruebas funcionales

Uno de los factores que más ha influido en el avance de la fisiología del ejercicio ha sido el desarrollo de numerosos test e instrumentos para el estudio de la función respiratoria, resumidos en el estudio de Dawson (1985). Entre los hechos más memorables cabe señalar: los estudios pioneros sobre la mecánica respiratoria de Borelli (1685), la invención del espirómetro por J. Hutchinson, el descubrimiento de la acción respiratoria del diafragma por Fick, la invención del pneumógrafo por Marey, el descubrimiento de la presión intratorácica y del carácter activo de la inspiración por Bert y Luciani y el descubrimiento de la presión negativa pleural por Ludwig d'Arsoval y Frédéricq. También fueron importantes los hallazgos relativos al control nervioso de la respiración, entre ellos la identificación de la inervación vagal de los músculos bronquiales y del centro respiratorio bulbar (Flourens, Gierke, Gad y Marinesco), así como la existencia de centros respiratorios espinales (Brown-Séquard) y la relación entre centros respiratorios y corteza cerebral (Hering y Breuer).

A mediados del siglo XIX se definen los volúmenes pulmonares estáticos «aire residual», «aire de reserva», «aire corriente», «aire complementario» y «capacidad vital» (Hutchinson). Posteriormente, se ideó el espirómetro de compensación (Tissot, 1904). A continuación, Hermansen (1933) define el concepto de ventilación voluntaria máxima. Strohl (1915) y, más tarde, Tiffeneau y Pinelli (1947) definen el concepto de espiración forzada máxima (VEMS) y capacidad pulmonar usada en esfuerzo (CPUE). Ulteriormente, Hyatt (citado por Dawson, 1985) describió la curva flujo-volumen. Hacia 1937, Cournand y Darling abordan el concepto de distribución y homogeneidad de la ventilación (Dawson, 1985).

Conocimiento de las leyes que gobiernan el transporte y el intercambio de gases

Conforme a Ferrero y cols. (1989), Heinrich y Magnus (1837) consiguieron las primeras determinaciones cuantitativas de gases en sangre, mostrando las diferencias en contenido de oxígeno y dióxido de carbono entre la sangre arterial y venosa. Posteriormente, Meyer (1857) demostró que la unión del oxígeno con la sangre esta relacionada con la presión atmosférica, y Paul Bert relacionó el denominado mal de montaña con la baja presión parcial de oxígeno en el aire inspirado. La formulación por parte de Fick en 1870 del principio que lleva su nombre permitió a los investigadores coetáneos y sucesores el estudio del control de la función respiratoria y del transporte de gases a los tejidos. De gran ayuda resultará en la evolución de esta área el desarrollo de los métodos de Haldane y Van Slyke, para la extracción manométrica de los gases sanguíneos, y el método de Scholander para la determinación de la concentración de oxígeno en el aire.

Mejora del conocimiento acerca del funcionamiento del aparato circulatorio

De capital importancia para el ulterior desarrollo de la fisiología del ejercicio resultaron los estudios pioneros de Harvey sobre la acción de bomba del corazón y la circulación de la sangre, así como el descubrimiento de la circulación pulmonar por Servet. Hacia 1600 Santorio introdujo el primer instrumento de la cardiología, «el pulsilogio», destinado a medir la frecuencia del pulso. Durante el siglo XIX (ver Laín Entralgo, 1978) se aclaran algunos de los mecanismos que gobiernan la contracción cardíaca, se mejoran los conocimientos sobre hemodinámica, se descubre la inervación vasomotora (Bernard) y la inervación vagal del corazón (Bernard, Galvani, Ens y Weber, Cyon), así como la existencia de un centro vasomotor en el bulbo (François-

Frank) y el sistema de conducción intracardíaco (Hiss, Keith y Flack, Aschoff y Tawara). Asimismo se aclara la dinámica de la circulación sanguínea intracardíaca (Chaveau y Marey), se cuantifica el trabajo del corazón (Tigersted y Cyon) y se introduce el galvanómetro de cuerda de Einthoven.

Los avances en hemodinámica son notables a partir de la introducción por Poiseuille de la ley que lleva su nombre, y de numerosos instrumentos, como el kimógrafo (Ludwig), el hemodromómetro (Volkman), el «contador de corriente de Ludwig», el esfigmomanómetro (Vierordt y Marey) y el pletismógrafo, por citar los más relevantes.

Establecimiento de las bases de la biomecánica

De gran trascendencia fueron las aportaciones pioneras de Leonardo da Vinci, en cuanto a las palancas óseas, sus relaciones con los músculos, su localización anatómica y su función. Mucho mayor desarrollo logró la biomecánica a partir de los estudios de Fabrizi d'Acquapendente, que, alrededor de 1600, trató de entender y explicar la mecánica de la marcha humana y el vuelo de las aves, concibiendo el músculo como un sistema de fibras longitudinales y transversales gobernado por las leyes de la palanca. En la misma época Santorio introdujo sistemáticamente la pesada. Stenon y, especialmente, Borelli continuaron los trabajos sobre la mecánica del movimiento de sus predecesores, permaneciendo vigentes gran número de sus hallazgos. Ya a principios del siglo XX, Archivald Hill establecerá la relación entre fuerza y velocidad de la contracción muscular y entre la potencia desarrollada y la velocidad de la contracción muscular. A mediados de este siglo, los Huxley propusieron la teoría de los filamentos deslizantes como mecanismo para la génesis de tensión, desvelándose uno de los misterios que durante más tiempo había suscitado el interés de los investigadores. Asimismo se relacionó la respuesta elástica del músculo en tensión con los puentes cruzados actomiosínicos. Posteriormente, los fisiólogos italianos Cavagna, Margaria y Bosco, así como los escandinavos Asmussen y Komi profundizarán en el estudio del comportamiento elástico del músculo y en el estudio de la respuesta muscular durante el ciclo estiramiento-acortamiento.

Numerosos instrumentos se han ido introduciendo a lo largo de este siglo para facilitar la determinación de las variables biomecánicas: dinamómetros extensiométricos, que han ido siendo desplazados por células de carga y galgas extensiométricas, mucho más exactas, que los dinamómetros de muelle; plataformas de fuerza, dinamómetros isocinéticos, cámaras de filmación de alta velocidad, sistema de digitalización, acelerómetros, goniómetros, electromiógrafos, etcétera.

El avance de la bioquímica y la energética de la contracción muscular

A finales del siglo XVIII, Scheele descubrió el ácido láctico. Ya en 1807, Berzelius asoció la producción de ácido láctico con la contracción muscular. Posteriormente, hacia mediados del siglo XIX, Du Bois-Reymond, fue el primer fisiólogo en determinar la presencia de ácido láctico en la musculatura. Este investigador, además, inventó aparatos para la medición de fenómenos eléctricos que utilizó en sus estudios de fisiología neuromuscular. En la segunda mitad del siglo XIX, Pflüger y Schmieddeberg demostraron la existencia de enzimas respiratorias en los tejidos.

Ya a principios de este siglo, Fletcher y Hopkins (1907) demuestran claramente que el lactato se produce durante la contracción muscular, sentando las bases de las hipótesis que relacionan el lactato y la fatiga. Fletcher y Hopkins (1907) estudiaron la producción de lactato en el músculo en reposo. Observaron que en un ambiente rico en oxígeno la producción de lactato era escasa, mientras que en condiciones anaerobias la producción de lactato era elevada. También demostraron que, al estimular la contracción muscular, la concentración de lactato podía multiplicarse por 10.

En 1909 Douglas y Haldane comentaron que la formación de ácido láctico es importante para la estimulación de la respiración durante el esfuerzo físico intenso.

A principios del pasado siglo Meyerhof (1911) y Hill (1911) distinguieron una fase aerobia y una anaerobia en la contracción muscular. La presencia de ácido láctico se consideraba imprescindible para el funcionamiento mecánico muscular, el cual descomponían en una primera fase de contracción, que suponían tenía lugar en anaerobiosis, origen de la producción de calor «inicial». La segunda fase la denominaron de restauración, caracterizada por la aparición del calor «retrasado o tardío» proporcionado por las vías metabólicas aerobias. No obstante, en esa época ambos investigadores pensaban que el ácido láctico era la sustancia que desencadenaba la

contracción muscular. De enorme importancia fueron los descubrimientos del ATP y de la fosfocreatina (Lohmann, Fiske, Subbarow).

En 1924, Hill y cols. postularon que el aumento de lactato durante el ejercicio era debido a un desequilibrio entre el oxígeno disponible en los músculos para la obtención de energía y el O_2 requerido por el esfuerzo que se estaba realizando. De este modo fue afianzándose la idea de que la producción de ácido láctico respondía a una insuficiencia en el aporte de O_2.

Años después, Embden (1926) dedujo que la formación de ácido láctico era un proceso exotérmico, aprovechándose la energía liberada para producir la contracción muscular. Al poco tiempo, se constató que una serie de cargas de trabajo podían ser sostenidas sin cambios en la concentración sanguínea de ácido láctico, con respecto al valor de reposo. Meyerhof, de 1922 a 1930, identificó las reacciones químicas que relacionan el glucógeno muscular con la producción de lactato, área en la que también trabajó nuestro insigne científico Severo Ochoa. En 1931 Lundsgaard demostró que los fosfágenos (ATP, PCr) son los compuestos ricos en energía y moneda de pago energético en las células. Posteriormente, se identificaron las reacciones del ciclo de Krebs (1940) y otras vías metabólicas, como el ciclo de Cori, etc. (Laín Entralgo, 1978).

Diseño de los primeros calorímetros

De acuerdo con Dawson (1985), Voit y y Pettenkoffer (1862) diseñaron el primer aparato para realizar determinaciones calorimétricas indirectas. Más tarde, Rubner (1894) construyó un calorímetro capaz de averiguar con gran exactitud el valor calórico del oxígeno. En este campo fueron cruciales las contribuciones de Atwater (Fig. 1.2). Poco después, los estudios de Magnus, Levy, Zuntz y Geppert establecerán definitivamente las bases de la calorimetría indirecta y de la medición actual *online* del VO_2 durante el esfuerzo.

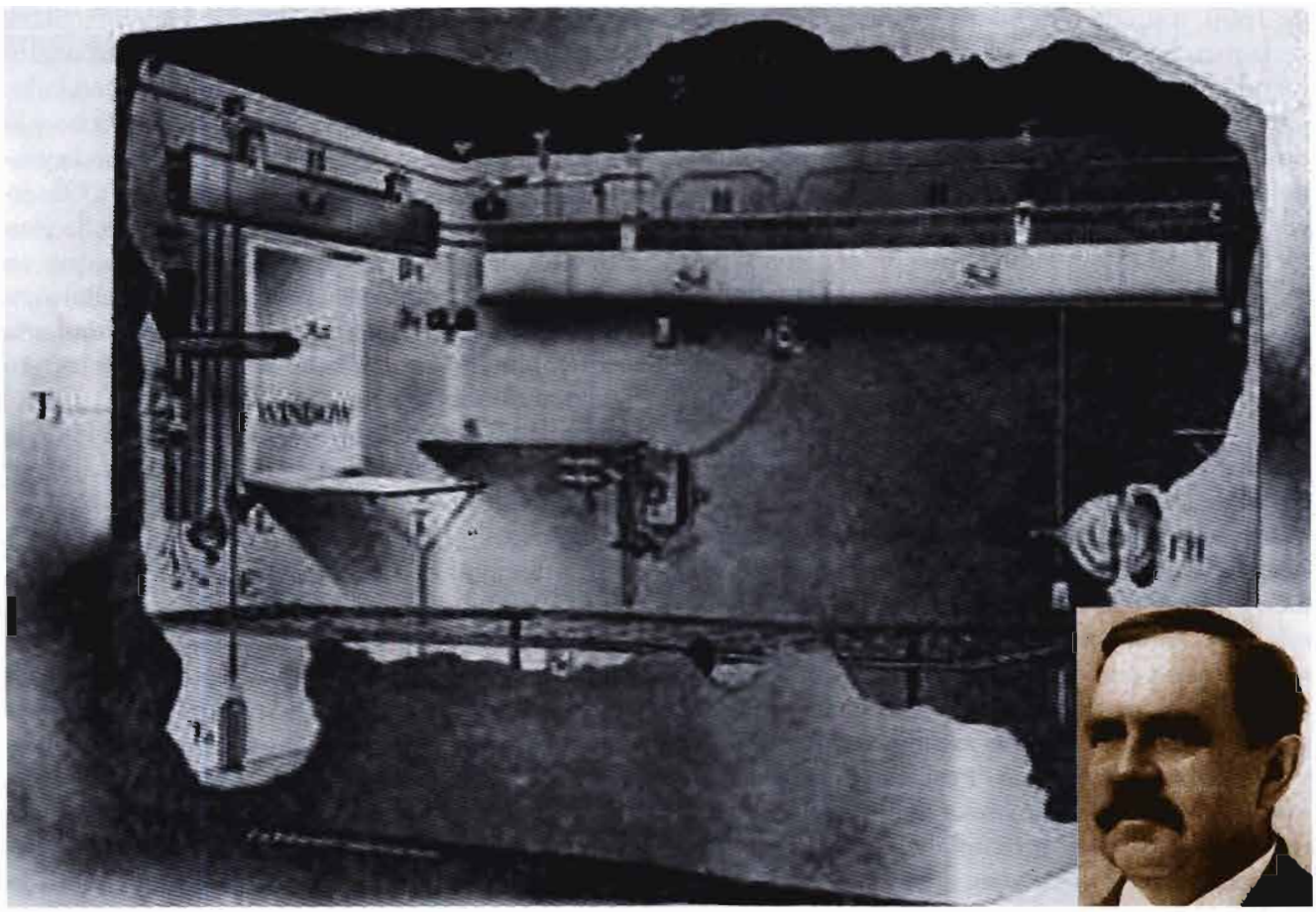


Figura 1.2. *Wilbur Olin Atwater (1844-1907). Calorímetro para seres humanos diseñado por Atwater. De 1879 a 1882 Atwater determinó la composición química y los valores nutricionales de tejidos de peces y animales. Estudió en Berlín y Leipzig, donde entró en contacto con los eminentes fisiólogos alemanes de la época Voit, Rubner y Zuntz.*

Desarrollo de los primeros ergómetros

Según Mellerowicz (1981), el primer ergómetro, entendido como un instrumento que permite cuantificar la cantidad total de trabajo mecánico efectuado durante el esfuerzo, fue desarrollado por Speck en 1883. Se trató de un ergómetro de manivela. Este ergómetro fue sucesivamente mejorado por Zuntz, Katzenstein y Fick. El ergómetro de Fick (1891) ya era muy parecido a los cicloergómetros de freno mecánico que se utilizan en la actualidad. La evolución ulterior de los ergómetros de freno mecánico dará lugar a los conocidos ergómetros de Fleisch y Monark.

Hacia principios del siglo XX se desarrollaron los primeros ergómetros de freno electrodinámico. Así, Atwater y Benedict usaron un cicloergómetro frenado por una pequeña dinamo (1903), pero resultó ser bastante inexacto, sobre todo a frecuencias de pedaleo elevadas, por lo que cambiaron la rueda de atrás por un disco de cobre girando entre los dos polos de un electroimán, con lo que, en 1912, se construyó el primer cicloergómetro que permitía mantener un esfuerzo a intensidad constante, independientemente de la frecuencia de pedaleo (Fig. 1.3). Poco después, Krogh mejoró el ergómetro de Benedict al dotarlo de un sistema fiable de calibración. El ergómetro de Krogh ha permanecido en uso desde 1913. Posteriormente, aparecieron nuevos cicloergómetros que fueron mejorando sus prestaciones (Knipping, Kelso y Hellebrandt, Grosse-Lodermann y Müller, Hölmgren y Mattson, etcétera).

En la década de los veinte, se introdujo el tapiz rodante en los estudios de fisiología del ejercicio en el Laboratorio de Fatiga de Harvard. Desde entonces se han ido mejorando las prestaciones de los tapices, que en la actualidad constituyen uno de los instrumentos más utilizados en los laboratorios de fisiología del ejercicio.

Tras la demostración en torno a 1930 de que los cambios electrocardiográficos producidos por la isquemia coronaria podían ser reproducidos de forma bastante segura mediante la realización de un test de esfuerzo, se inicia el interés de los cardiólogos

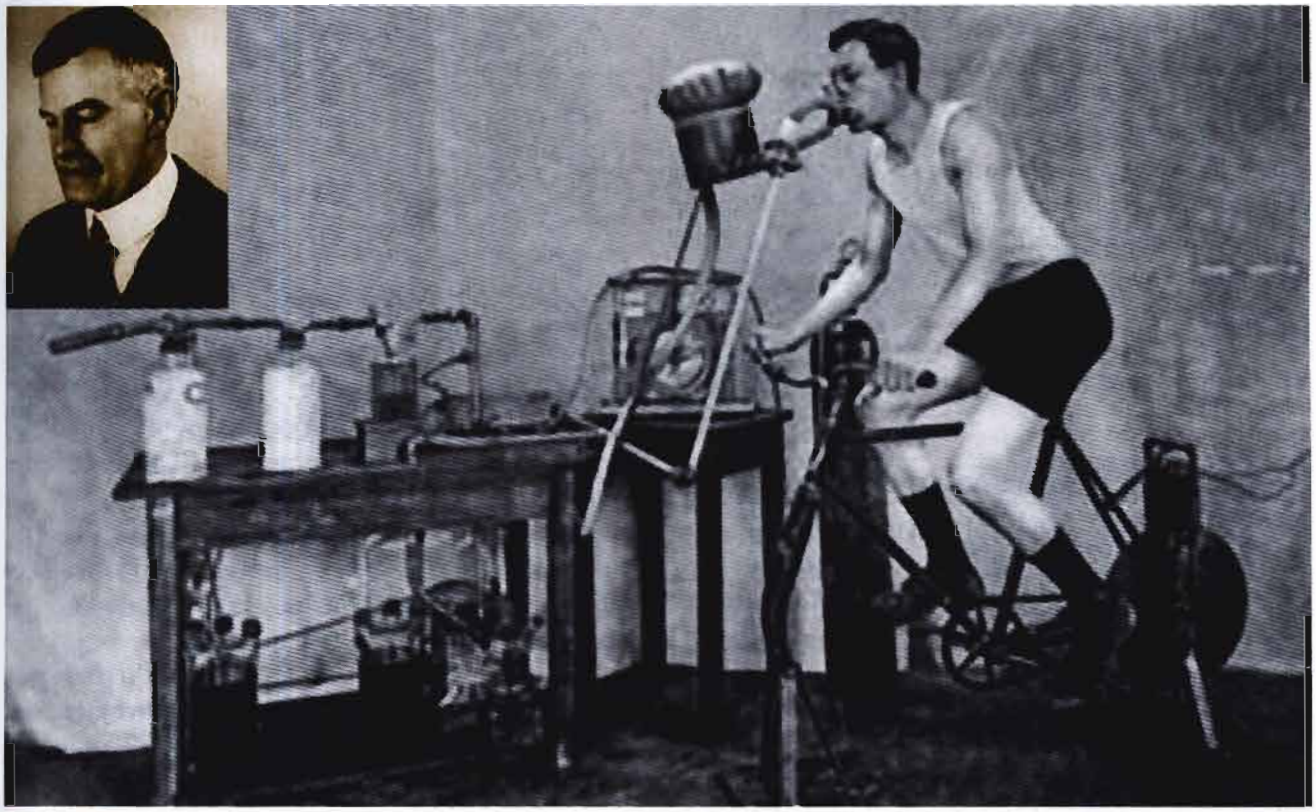


Figura 1.3. *Francis Gano Benedict (1870-1957). Químico de formación, trabajó con Atwater en la Universidad de Wesleyan (EEUU). Benedict estudió el metabolismo energético en recién nacidos, niños, adolescentes, deportistas, gente en ayuno y vegetarianos. Además investigó los efectos de la dieta, la temperatura y el ejercicio en el metabolismo. Viajó al laboratorio de Christian Bohr en Copenhague en 1907, donde conoció a August Krogh (ganador del premio Nobel de Fisiología o Medicina en 1920). El verano siguiente Benedict acompañó a Krogh a Groenlandia, donde estudió el metabolismo en esquimales. En la imagen de la derecha se puede ver al propio Benedict durante un experimento en el primer cicloergómetro que permitía mantener un esfuerzo a intensidad constante, independientemente de la frecuencia de pedaleo.*

clínicos por el valor diagnóstico y pronóstico de los test de esfuerzo en la coronariopatía isquémica (Heil y Siegel, Goldhanimer y Scherf). Como consecuencia, empieza el desarrollo de nuevos ergómetros de más fácil manejo que los utilizados anteriormente en la investigación fisiológica. Este proceso desembocará en el diseño de los ergómetros de freno electromagnético y, más recientemente, de freno electromecánico.

Parte de los problemas que planteaba la necesidad de disponer de sacos de Douglas para las mediciones de VO_2 y VCO_2 durante el ejercicio, fueron subsanados por Fleisch, quien construyó un aparato, el *metabograph*, capaz de medir estas variables, como ya hacía la escuela alemana, más el registro continuo del VCO_2 y el cociente respiratorio, lo que supuso un gran avance. No obstante, la escuela escandinava continuará trabajando con sacos de Douglas, ya que, aún hoy en día, los sistemas automáticos no han conseguido superar la precisión del método patrón en la medición del consumo de oxígeno y la producción de dióxido de carbono, que es el que utiliza sacos de Douglas y espirómetros mecánicos (Christensen, Astrand, Rodahl). A partir de 1950, gracias a la automatización de los equipos desarrollados por Knipping y Fleisch, las pruebas espirométricas se convierten en técnicas muy fáciles de llevar a cabo. Aunque ya estaba definido, el equivalente respiratorio fue bien estudiado durante el esfuerzo por Hollam y Tietz (1954), al igual que ocurrió con el llamado límite de la capacidad de esfuerzo de larga duración, que completó Müller (1957) en el Instituto de Fisiología del Ejercicio Max Plank de Dortmund (citados en Ferrero y cols., 1989).

El desarrollo de los test de esfuerzo

En 1923, A. V. Hill y Lupton definieron el consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}) al observar que el VO_2 aumentaba de forma directamente proporcional a la intensidad de esfuerzo, hasta alcanzar un nivel a partir del cual, a pesar de seguir aumentando la intensidad, el VO_2 ya no aumentaba, produciéndose un aplanamiento en la relación VO_2/intensidad. Archivald Hill fue el primer investigador que determinó el VO_{2max} en seres humanos (Hill y Lupton, 1923). Asimismo, descubrió que el VO_2 permanece elevado durante los primeros minutos de la recuperación, una vez finalizado el esfuerzo, denominando al exceso de VO_2 sobre los niveles correspondientes a la situación de reposo deuda de oxígeno (Hill y cols., 1924). La cuantificación de la deuda de oxígeno fue utilizada para medir la participación del metabolismo anaerobio durante el ejercicio. También se utilizó en los años cincuenta y sesenta el valor máximo de «deuda de oxígeno» como un criterio de capacidad anaeróbica. Tal y como hemos señalado anteriormente, Hill también efectuó numerosos estudios sobre la fisiología y la mecánica de la contracción muscular, describiendo la relación existente entre fuerza y velocidad de acortamiento muscular (Hill, 1911, 1938, 1950).

Las primeras determinaciones de VO_2 (Hill y Lupton, 1923) se efectuaron utilizando sacos de Douglas. Más tarde Brauer y Knipping (1929) crean el ergoespirógrafo, con lo que fue posible realizar registros continuos durante una prueba de esfuerzo, ahorrando gran cantidad de tiempo. Gracias a esto pudo ser comprobada la relación lineal entre la carga de trabajo y el consumo de oxígeno, así como entre ambas y la frecuencia cardíaca (Christensen y Astrand), base fundamental para el desarrollo de test indirectos para estimar el VO_{2max}.

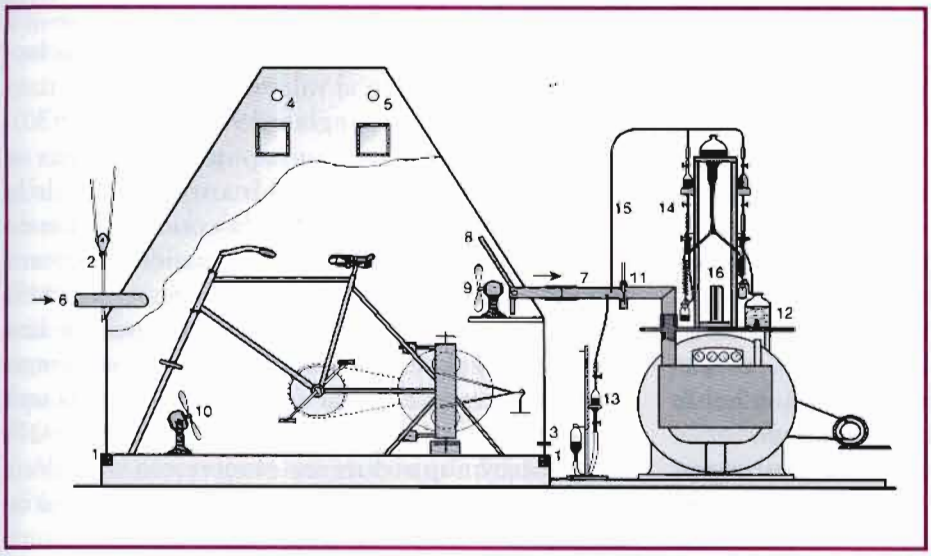
Los estudios de Hill y Krogh (Fig. 1.4), ambos laureados con el premio Nobel de Fisiología y Medicina, establecieron la base sobre la que se han desarrollado las técnicas modernas de evaluación de la capacidad de resistencia y de la fuerza muscular. La evaluación de la función contráctil *in vivo* se basa, hoy en día, en la medición de la fuerza desarrollada en condiciones estandarizadas de longitud muscular al inicio de la contracción, de recorrido articular y de velocidad de acortamiento. Hoy en día, mediante la utilización de máquinas isocinéticas se pueden controlar los factores mencionados y, por lo tanto, estudiar la función contráctil del músculo en distintos puntos de la curva fuerza-velocidad descrita por Hill.

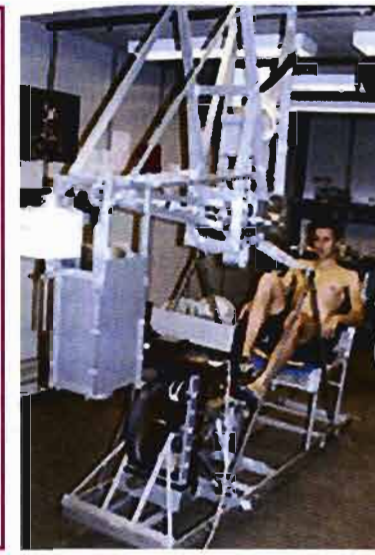
Posteriormente, Sid Robinson y cols. (Fig. 1.5) publicaron el primer estudio que identificaba el VO_{2max} como un factor determinante de la capacidad de rendimiento físico.

Müller en 1943 presentó el primer trabajo que demostró la especificidad de las adaptaciones periféricas al entrenamiento de resistencia. Concretamente, Müller estudió a un sujeto de 18 años, al que sometió a entrenamiento de pedaleo con una pierna durante 10 semanas. El programa de entrenamiento produjo un descenso de la frecuencia cardíaca de 129 a 95 latidos · min.$^{-1}$ durante el pedaleo a una intensidad que requería un VO_2 de 1,6 l · min.$^{-1}$. A la décima semana de entrenamiento dejó de entre-



Figura 1.4. *August Krogh (1874-1949). Krogh inició su carrera en el laboratorio de Christian Bohr (1855-1911), que a su vez se formó con Carl Ludwig en Leipzig, Alemania. Desarrolló instrumentos muy precisos para medir el intercambio de gases en distintos animales, demostrando que el O_2 pasa de los alvéolos a la sangre por difusión y no por secreción, como se pensaba en la época. Publicó más de 300 artículos, muchos de ellos considerados «clásicos» de la fisiología del ejercicio. Por ejemplo, Krogh y Johannes Lindhard (1870-1947) estudiaron la regulación de la respiración y la circulación sanguínea durante el ejercicio y la recuperación. Krogh diseñó un ergómetro aún en uso en el Intituto August Krogh de la universidad de Copenhague (imagen inferior). Además, perfeccionó un método basado en óxido nitroso para medir el gasto cardíaco. En 1920 recibió el premio Nobel de Fisiología o Medicina por sus estudios sobre la circulación capilar en los músculos en reposo y durante el ejercicio.*





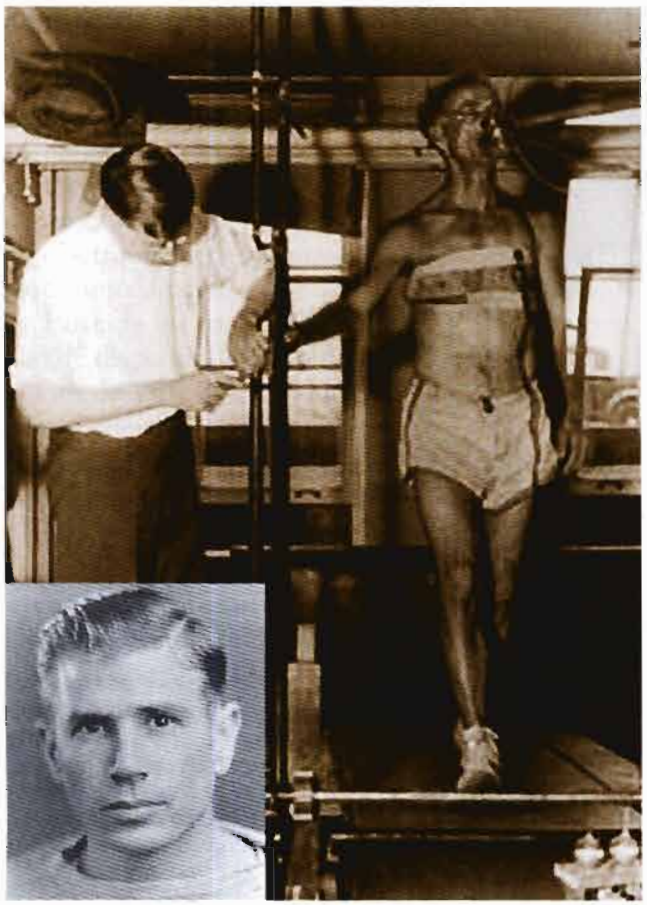


Figura 1.5. *Sid Robinson, corredor de fondo de elite (miembro del equipo olímpico americano de 1.500 m) e investigador. Trabajó en el laboratorio de fatiga de Harvard. Por sus contribuciones al avance del conocimiento en el campo de la fisiología del ejercicio recibió el* Honor Award of the American College of Sports Medicine *en 1967. Entre sus principales trabajos destacaron sus estudios sobre la influencia de la edad en el* VO_{2max} *y sus trabajos de termorregulación.*

nar la pierna, y pasó a trabajar el pedaleo con los brazos durante tres semanas. Como consecuencia, la frecuencia cardíaca durante el pedaleo de brazos pasó de 140 a 116 latidos · min.$^{-1}$ a un VO_2 de 1,4 l · min.$^{-1}$, mientras que la pierna se desentrenó, siendo entonces la frecuencia cardíaca de 126 latidos · min.$^{-1}$ a un VO_2 de 1,6 l · min.$^{-1}$.

La mayoría de los test de esfuerzo se desarrollaron para evaluar la tolerancia al esfuerzo de personas afectas o con sospecha de padecer una coronariopatía isquémica. Entre ellos merecen ser recordados el test de Lian (1916) de carrera estática *in situ* al ritmo de dos pasos por segundo; el test de Master (1929) de dos peldaños, en el que había que subir y bajar un número determinado de veces (en 30 segundos en el test simple, y en tres minutos en el test doble) según el sexo, edad y peso del sujeto; el test de Johnson y cols. (1942) del Laboratorio de Fatiga de Harvard, o prueba del escalón de Harvard, similar en muchos aspectos al *two-step test* de Master, que se utilizó en atletismo (ver referencias en López Calbet, 1999).

Un importante avance en la ergometría se derivó de la introducción del tapiz rodante motorizado en el Laboratorio de Fatiga de Harvard. Más adelante, Yu y cols. (1951) y, poco después, Bruce (1956), lo adoptan para los test de esfuerzo en cardiología. No obstante, una de las mayores contribuciones a la evaluación de la condición física provino de la escuela escandinava, interesada ya en los años cincuenta en la búsqueda de procedimientos indirectos para la determinación de la capacidad de resistencia. Así, Astrand y Ryhming propusieron un test submáximo para determinar, a partir de la frecuencia cardíaca, el consumo máximo de oxígeno (Astrand y Ryhming, 1954). Posteriormente se desarrollaron test similares al de Astrand y Ryhming en tapiz rodante, como por ejemplo el test de Balke y Ware (1959). También en esta época se publicaron test más prácticos, que han sido muy utilizados en el ámbito de la educación física y del entrenamiento, como el test de Cooper (1968) y el test de Léger y Boucher (1980).

En el campo de la educación física, también se diseñaron algunos tests que han resistido el paso del tiempo. Sirva como ejemplo el test de salto vertical a pies juntos que Dudley Sargent introdujeron en 1921 para valorar la potencia muscular de las extremidades inferiores.

Introducción del concepto de umbral anaerobio

Ya a principios de siglo se constató que cuando la intensidad del esfuerzo era aumentada más allá de cierto nivel se producía un aumento de la lactatemia con respecto al valor de reposo (Christiansen y cols., 1914; Douglas, 1927; Owles, 1930). También se comunicó que, lo que en la época se conocía como «poder combinante de CO_2 de la sangre» (fundamentalmente la concentración de bicarbonato HCO_3^-) disminuía cuando la concentración de lactato estaba elevada. Schenk (1925) y Jervell (1928) demostraron la existencia de una relación directa entre el aumento de la concentración de lactato y la caída de la reserva alcalina sanguínea durante el esfuerzo. Bock y cols. (1927) comprobaron que durante el ejercicio la acidosis metabólica se produce a una intensidad umbral de trabajo.

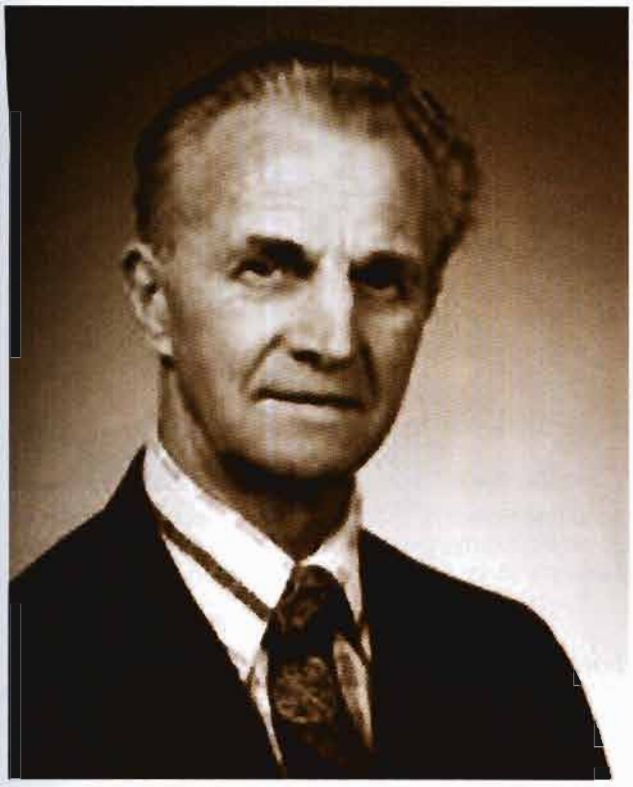


Figura 1.6. *Albert HL Bruno Balke (1907-1999), alemán de nacimiento, atleta de elite, estudió educación física en la academia alemana de educación física dirigida por Carl Diem. Posteriormente estudió medicina en Berlin graduándose en 1936. En 1938 participó en la expedición alemana al Monte Everest. Hizo su doctorado en fisiología en la universidad de Leipzig. En 1950 se trasladó a Estados Unidos, donde trabajó para el ejército americano. Entre 1950 y 1960 publicó numerosos trabajos sobre los efectos que el reposo en cama, la pérdida de sangre, la altitud y la hipocapnia tienen sobre la capacidad de esfuerzo en seres humanos. Entre 1960 y 1964, trabajó en el diagnóstico de la coronariopatía isquémica y en los efectos del ejercicio sobre la enfermedad coronaria en la* Civil Aeromedical Research Institute of the Federal Aviation Agency. *En 1964 se incorporó como* Professor *(Catedrático) of* Physiology and Physical Education *de la Universidad de Wisconsin. Sus estudios figuran entre los más citados de la fisiología del ejercicio. Fue el primer* editor in Chief *de la revista* Medicine and Science in Sports and Exercise.

En 1929 Herbst comunicó que los H^+ procedentes del ácido láctico parecían condicionar la capacidad de resistencia al esfuerzo: «*cuanto mayor es la cantidad de ácido láctico que puede acumularse en la sangre durante el ejercicio antes de la extenuación, tanto mayor es el nivel de resistencia. Puesto que el ácido láctico formado debe ser fijado por el álcali del organismo, la capacidad de rendimiento humana depende de la reserva alcalina de la sangre y de los tejidos*» (Herbst, 1929).

Varios autores demostraron que en el caso de un esfuerzo de idéntica carga de trabajo, los sujetos entrenados mostraban lactatemias menores que los no entrenados (Bang, 1936; Robinson y Harmon, 1941; Crescitelli y Taylor, 1944; Holmgren y Ström, 1959). En este tiempo estaba claro que la fatiga en esfuerzos prolongados y de larga duración no estaba causada por cambios en el pH o lactato musculares. Asmussen y cols. (1948) proporcionaron nuevas evidencias relacionando la fatiga en esfuerzos de alta intensidad con la acumulación de lactato en el músculo.

Pero no es hasta el final de la década de los cincuenta (Hollmann, 1959) cuando se emplea la determinación de la zona, o intensidad de esfuerzo, correspondiente al inicio del metabolismo anaerobio en la valoración de la capacidad aerobia cardiopulmonar y periférica. Hollmann (1959) observó que en el curso de un esfuerzo de intensidad progresiva, en un momento determinado se alcanzaba un punto, a partir del cual la ventilación (V_E) aumenta de forma más acusada que el VO_2. Puesto que los cambios en el lactato arterial y en la V_E coincidían en el tiempo decidieron denominar a este punto como *punto de eficiencia ventilatoria óptima*.

Posteriormente, en 1964 y en 1973, Wasserman y cols. publicaron sendos trabajos en los que confirmaban los hallazgos de Hollmann. No obstante, propusieron que se utilizara el término de *umbral anaeróbico* para referirse al «punto de eficiencia ventilatoria óptima» de Hollmann (Wasserman y cols., 1973). Desde entonces, dicho término se ha impuesto en la literatura científica. La determinación del umbral anaeróbico, o su equivalente, el umbral láctico, constituye uno de los procedimientos más usados en la evaluación de la condición física y la respuesta al entrenamiento.

Reintroducción de la técnica de biopsia muscular y diferenciación de las fibras musculares según características morfofuncionales

La biopsia muscular mediante aguja fue introducida inicialmente en clínica para el estudio de las distrofias musculares a finales del siglo XIX por Duchenne de Boulogne (Fig. 1.7). No obstante, los requerimientos de los anatomopatólogos, llevaron a optar por el uso de la biopsia mediante incisión amplia, que permite la obtención de piezas de mayor tamaño. Fue el mérito de Jonas Bergstrom (1962) la reintroducción de esta técnica para obtener pequeñas muestras de tejido muscular en humanos, facilitando el avance de la bioquímica y de la histología muscular (Fig. 1.7). Esta técnica permitió cono-

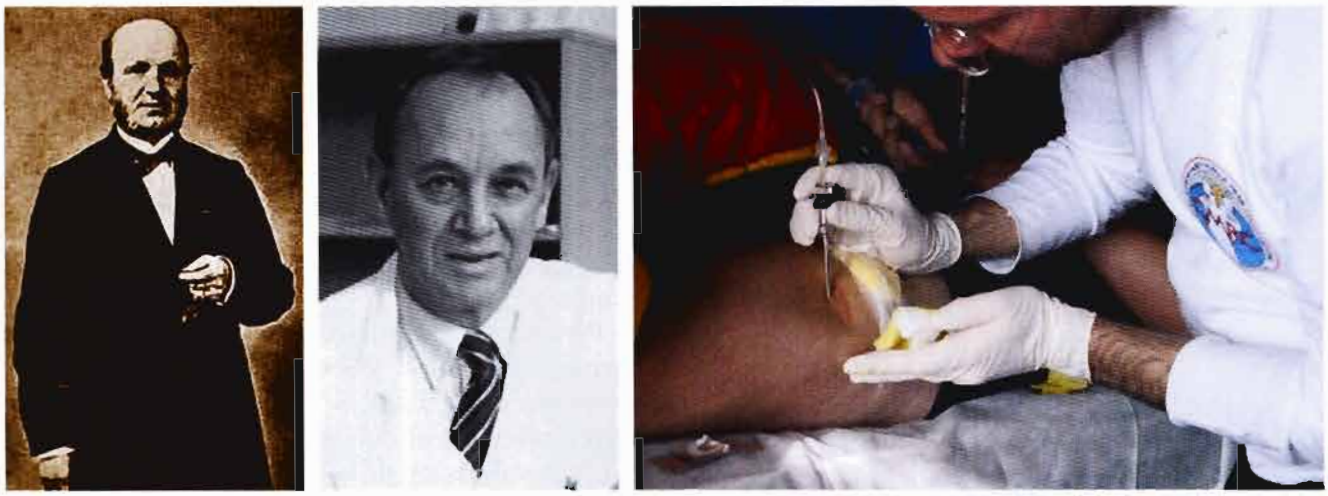


Figura 1.7. *A la izquierda, Duchenne de Boulogne (1861), quien diseñó una técnica para la obtención de biopsias musculares a finales del siglo XIX. En medio, Jonas Bergström, quien mejoró la aguja de biopsia muscular de Duchenne con motivo de los estudios de su tesis doctoral (1962). A la derecha, realización de una biopsia muscular con la aguja de biopsia de Bergström durante la expedición del CMRC a Monte Rosa en agosto de 2004.*

cer la elevada plasticidad del músculo humano y su capacidad de adaptación morfofuncional ante variados estímulos (entrenamiento de resistencia, de fuerza, atrofia por falta de uso, degeneración por denervación, etcétera).

En 1955 se describió un procedimiento que permitió la identificación de distintos tipos de fibras musculares en función de la actividad ATPasa (Padykula y Herman, 1955). Durante la década de los años sesenta se realizan las primeras mediciones de la actividad enzimática muscular (Dubowitz y Pearse, 1960). Estudios posteriores pusieron de manifiesto la gran plasticidad que exhibe el músculo esquelético en su adaptación al entrenamiento. Más adelante se publicaron las primeras mediciones fiables de la capilaridad del músculo esquelético humano (Andersen y Henriksson, 1977).

Descripción de las propiedades morfológicas y funcionales de las unidades motoras

A principios de los sesenta se produjeron importantes avances en neurofisiología que sentaron las bases para la comprensión de los mecanismos que regulan el fenotipo muscular. Fueron de particular importancia los experimentos que se desarrollaron en los laboratorios de John Eccles en Australia y Elwood Henneman en Estados Unidos. Buller y cols. (1960a; 1960b) demostraron que las diferencias en velocidad de contracción de los músculos de las patas traseras de los gatos aparecen durante el desarrollo neonatal y pueden ser modificadas por inervación cruzada. Henneman y cols. (1965, 1985) aislaron unidades motoras y pudieron verificar la existencia de una buena relación entre las propiedades contráctiles de una unidad motora y las características histoquímicas de las fibras que la integran. Asimismo fueron los primeros en llamar la atención sobre la gran variedad de unidades motoras existentes desde el punto de vista funcional. Después de múltiples experimentos con unidades motoras llegó a la conclusión de que las unidades motoras son reclutadas durante la contracción muscular en función de su tamaño, formulando lo que hoy en día conocemos como el principio del tamaño de Henneman (Henneman, 1985). La contribución de Elwood Henneman (Fig. 1.8) al avance del conocimiento de la organización estructural y funcional del control nervioso del movimiento sólo es comparable en importancia a los trabajos previos de Ramón y Cajal y Charles Sherrington. Tanto el descubrimiento de la heterogeneidad de las unidades motoras y fibras musculares que integran el músculo esquelético como su significado en el control del movimiento normal sentaron las bases de nuestro conocimiento sobre la plasticidad muscular y el control motor.

La fisiología del ejercicio en EEUU: El Laboratorio de Fatiga de Harvard

Antecedentes

En 1871, el Presidente de la universidad de Harvard, Charles William Elliot, promueve la reorgani-

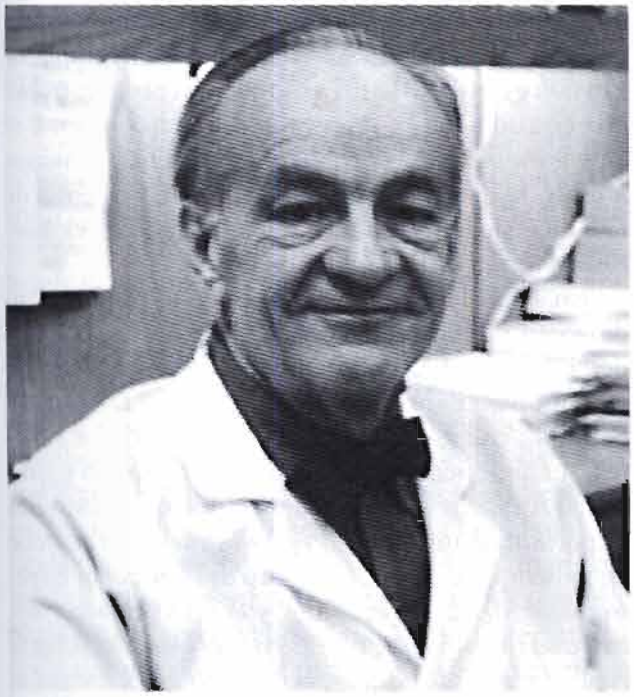


Figura 1.8. *Elwood Henneman (1915-1996) se licenció en Medicina en la universidad McGill de Montreal en 1943. Fue profesor de fisiología de la universidad de Harvard (*Harvard Medical School*). Estableció las bases de las teorías modernas de control motor, a partir de una serie de estudios experimentales que permitieron elaborar la teoría conocida como «el principio del tamaño» sobre el reclutamiento y desreclutamiento de las unidades motoras.*

zación de la Facultad de Medicina, modernizando los estudios conforme a las corrientes que emanan de Europa, especialmente del instituto de fisiología de Leipzig, dirigido por Carl Ludwig. Esta labor fue encargada a Henry Pikering Bowditch, que se graduó como médico en Harvard en 1868 y posteriormente trabajó con Ludwig. Henry Pikering Bowditch, expandió el currículum de los estudios de medicina e introdujo la experimentación en laboratorio en la formación de los futuros médicos. En la misma universidad de Harvard se crearon en 1891 los primeros estudios universitarios de educación física de Estados Unidos, integrados en un BS (en la actualidad sería algo parecido a un bachillerato especializado en ciencias) y tutelados por George Wells Fitz, médico graduado en Harvard en 1891. Estos estudios incluyeron materias como anatomía, fisiología, entrenamiento físico, fisiología del ejercicio, física experimental, química, química médica, zoología, lenguas extranjeras e historia de la educación física. Estuvo orientado a aquellas personas que quisieran dirigir gimnasios o como curso preparatorio para estudiar Medicina. La duración de los estudios era de cuatro años y de un rigor comparable a la de los estudios de Medicina; de hecho, algunas de las clases eran impartidas en la Facultad de Medicina por el mismo Bowditch. Este programa de estudios tuvo una vida muy corta, debido a la competencia de recursos con los laboratorios de la facultad de medicina, que llevaron a la desaparición del programa BS en 1899. Fitz fue el gran precursor del Laboratorio de Fatiga de Harvard. Entabló continuas luchas en contra de la aceptación indiscutida de premisas no probadas experimentalmente, incluidas las propuestas y explicaciones del modelo sueco de gimnasia de Ling. Continuamente clamó por la necesidad de crear laboratorios experimentales para demostrar con experimentos los efectos que la práctica del ejercicio podría tener sobre la salud.

Entre 1880 y 1890 se asiste en Estados Unidos a un interés creciente de los médicos por la actividad física. Esto obedeció a la expansión de las actividades deportivas tras la Guerra Civil Americana. Distintos estamentos sociales promovieron las confrontaciones deportivas como medio de regeneración física, social y espiritual de la joven nación americana. También surgieron detractores que arguyeron presuntos efectos debilitantes del ejercicio, que podrían causar muerte prematura. Los médicos se dividieron entre estas dos posturas, entablando discusiones en distintos foros acerca de las ventajas y desventajas del deporte colegial, aunque los argumentos empleados fueron más retóricos que científicos. A raíz de este interés se iniciaron en Estados Unidos los primeros estudios epidemiológicos acerca de los beneficios de la práctica del ejercicio. El primero fue John Morgan, que, en 1873, publicó el estudio acerca de la salud y longevidad de los hombres que habían remado en tripulaciones de Oxford y Cambridge entre 1829 y 1869. Otros dos estudios similares, también en remeros, llevaron a la conclusión de que el remo de competición no provocaba efectos negativos sobre la salud, ni a corto ni a largo plazo.

En 1886 Hartwell (primer director del *Gymnasium* de la universidad Johns Hopkins) publicó dos artículos titulados *On the Physiology of Exercise* en el *Boston Medical and Surgical Journal* (actualmente: *New England Journal of Medicine*), en los que basándose en los estudios sobre estimulación nerviosa y contracción muscular de DuBois Reymond y otros trabajos sobre crecimiento y patología del sistema nervioso defiende la importancia del ejercicio muscular para el normal desarrollo y crecimiento, así como para el normal funcionamiento del

aparato circulatorio y digestivo. Hartwell defendió en Estados Unidos el modelo de gimnasia sueco, al considerar que era el que estaba mejor fundamentado desde el punto de vista científico. Según Hartwell los objetivos del ejercicio físico eran: alcanzar y mantener el tamaño normal y la fuerza normal, así como adquirir hábitos correctos y económicos de acción neuromuscular. A ambos objetivos les confirió carácter higiénico (salud) y educativos (desarrollo neuromuscular). Diez años más tarde se incluyeron objetivos relacionados con el desarrollo social y psicológico.

En 1901, en Estados Unidos, se recomendaba una formación mínima para los profesores de educación física de al menos dos años cuyos contenidos eran:

- Música y entrenamiento de la voz: 45 horas.
- Física: 30 horas.
- Química: 60 horas.
- Anatomía (macroscópica y microscópica): 90 horas.
- Fisiología: 90 horas.
- Fisiología del ejercicio: 90 horas.
- Mecánica animal (Cinesiología): 45 horas.
- Higiene (primeros auxilios): 45 horas.
- Antropometría, prescripción del ejercicio, examen físico y diagnosis (parte teórica): 90 horas.
- Historia y teoría del entrenamiento: 100 horas.
- Pedagogía y Psicología: 90 horas.

Curiosamente, la carga lectiva en fisiología del ejercicio hace 100 años era superior a la carga que tiene esta materia en la actualidad en muchas facultades de educación física, cuando el conocimiento científico en esta materia es hoy en día mucho mayor que hace 100 años.

Los primeros trabajos de investigación

Fitz fue uno de los pioneros en la investigación en Fisiología del Ejercicio en Estados Unidos. Destacó su trabajo *Types of respiratory movements*, inicialmente publicado en los Proceedings de la 90 Reunión anual de la AAAPE de 1894 (*American Association for the Advancement of Physical Education*, presidida inicialmente por Edward Hartwell) y que al año siguiente se volvió a imprimir en el primer número del *Journal of Experimental Medicine*. Igualmente, entre los primeros estudios serios en fisiología del ejercicio hay que incluir el trabajo que realizó McCurdy en el Laboratorio de Fisiología de la Universidad de Harvard, titulado *The effect of maximum muscular effort on blood pressure*, publicado en el volumen 51 del *American Journal of Physiology* en 1901. En esa misma época se publicó el estudio de Thomas Story titulado *Influence of fatigue on the speed of voluntary contraction of human muscle*, realizado en la Laboratorio de Fisiología de la Universidad de Michigan y publicado en el *American Journal of Physiology* en 1903.

En 1896 Henry Beyers publicó el primer estudio longitudinal acerca de los efectos de la práctica de ejercicio sobre el crecimiento de los cadetes de Annapolis, analizando los cambios en talla, masa corporal, capacidad pulmonar y fuerza de los cadetes que practicaban fútbol americano, remo y gimnasia. A raíz de estos trabajos publicó dos estudios importantes: uno titulado *The influence of exercise on growth* en el primer número del *Journal of Experimental Medicine*, en 1894, y el otro titulado *Football and the physique of its devotees from the point of view of physical training*, publicado en el *Journal of Medical Sciences*, en 1896. Beyers concluyó que el remo era el deporte que proporcionaba el mejor entrenamiento.

Hacia finales del siglo XIX y principios del siglo XX se observó un gran aumento del interés por los efectos que el ejercicio podía tener sobre el corazón y el aparato circulatorio en general. En esta área trabajaron Darling, quién analizó a tripulaciones de remo de Harvard en 1899, Blake y Larrabee, que estudiaron a maratonianos entre 1900 y 1902 (publicado en el *Boston Medical and Surgical Journal*) y Savage, que analizó los efectos agudos de una carrera de Maratón sobre el tamaño del corazón, la frecuencia del pulso, la presión arterial y la temperatura, en su trabajo de 1910, publicado en la *American Physical Education Review*.

La creación del Laboratorio de Fatiga de Harvard

El famoso bioquímico L. J. Henderson (muy conocido por sus estudios sobre el equilibrio ácido-base) funda en Estados Unidos el denominado *Laboratorio de Fatiga de Harvard* (1927). Esta unidad de investigación se centró en el estudio de la fisiología del ejercicio, con especial interés por la influencia del estrés ambiental (calor y altura) sobre el funcionamiento del organismo humano. L. J. Henderson (1878-1942) se formó con J. S. Haldane en Oxford, y J. Barcroft en Cambridge. Sin embargo, no sólo la fisiología del ejercicio, sino también la evaluación de la condición física, se encontró entre

los objetivos del laboratorio de fatiga de Harvard, tal y como demuestra este texto del fundador, recopilado por Dill (1967):

...«Such studies yield quantitative description of differences between individuals. Until recently the study of individual differences has been more actively pursued by physical anthropologists, who have to rely in great part on measurements of bones, and by physicians in the study of their cases, than in other fields of research. Such studies have proved to be not altogether satisfactory, for the more interesting individual traits are not in general highly correlated with the form and size of the skeleton, and illness is, as often as not, more or less accidental. So it has become apparent that a broad understanding of individual differences in the human race is likely to rest upon a foundation that is chiefly physiological and psychological. Meanwhile, attacks upon the physiological problem involved seem to have become possible.

From another point of view this subject involves the study of human genetics. But the geneticist must know what physiological characters to look for, and only the physiologist can tell him, and he can tell him only when he has found them. *Also it is evident that the physiological pattern of the individual is an important factor in determining fitness for work, just as it is in determining excellence as a sprinter or as a football player. It also explains the kind of changes that work produces in a worker. Further, it probably determines some of the diseases that a man suffers and it can hardly fail to modify the course and result of all his diseases. Finally, the physiological pattern of the individual is far from independent of his psychological pattern.*»

La dirección del Laboratorio de Fatiga de Harvard fue desempeñada por David Bruce Dill (Fig. 1.9). Bajo la dirección de Dill se efectuaron gran cantidad de estudios, muchos de ellos en el terreno (desierto de Nevada, *White Mountain* en California, etc.), acerca de los factores limitantes del rendimiento humano. Por ejemplo, se determinó la relación entre VO_{2max} y capacidad de resistencia, la influencia del envejecimiento en la capacidad de resistencia y la influencia de la hipoxia en la capacidad de rendimiento. Asimismo se efectuaron importantes aportaciones a la comprensión del equilibrio ácido base, la fisiología del transporte de gases por la sangre, etc., siendo los primeros en efectuar estudios rigurosos en tapiz rodante (Legido Arce, 1995).

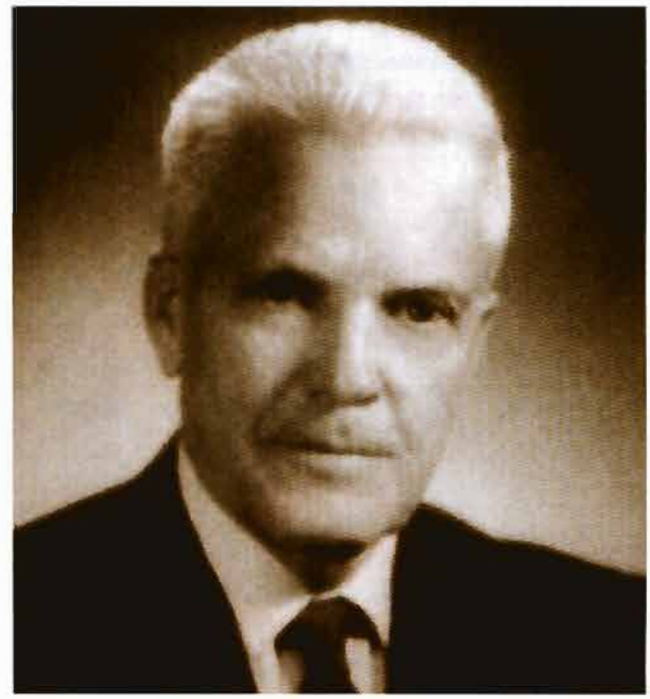


Figura 1.9. *David Bruce Dill, director del Laboratorio de Fatiga de Harvard. Destacó por sus estudios sobre acerca de los factores limitantes del rendimiento humano en condiciones ambientales muy dispares. También estudió el metabolismo, el transporte de gases y el equilibrio ácido-base durante el esfuerzo.*

Uno de los estudios más interesantes fue llevado a cabo por Sid Robinson, quien en 1938 publicó su tesis demostrando que el consumo máximo de oxígeno disminuye con la edad y que la principal causa es la disminución de la frecuencia cardíaca máxima.

El laboratorio de fatiga de Harvard fue clausurado en 1947; no obstante, tuvo una gran influencia en la evolución de la fisiología del ejercicio tanto en Estados Unidos como en Europa. Muchos de los fisiólogos del ejercicio que estudiaron e investigaron en laboratorio de fatiga de Harvard se trasladarían a otras universidades americanas o a Europa, donde fundaron nuevos laboratorios, muchos de los cuales han subsistido hasta nuestros días.

La tabla 1 cita algunos de los artículos científicos y libros más relevantes publicados entre 1855 y 1942 sobre fisiología del ejercicio.

Después del Laboratorio de Fatiga de Harvard

Después de la Segunda Guerra Mundial y hasta la actualidad, la contribución estadounidense a la fisiología del esfuerzo será notable. En 1948 la *American Physiological Society* inicia la publicación del *Journal of Applied Physiology*, que pronto se convierte en la mejor revista científica de fisiología del ejerci-

Tabla 1
Manuscritos y libros de texto de Fisiología del Ejercicio publicados antes de 1942

Autor	Título	Año	Tipo
Byford WH	*On the physiology of exercise*	1855	M
Flint A	*Influence of excessive and prolonged muscular exercise*	1970s	M
Hartwell EM	*On the physiology of exercise*	1887	M
Lagrange F	*Physiology of bodily exercise*	1888	L
Fitz GW	*Principles of physiology and hygiene*	1908	L
McKenzie RT	*Exercise in education and medicine*	1909	L
Benedict FG, Cathcart EP	*Muscular work, a metabolic study with special reference to the efficiency of the human body as a machine*	1913	L
Smith HM	*Gaseous exchange and physiological requirements for level and grade walking*	1922	L
Brainbridge FA	*The physiology of muscular exercise*	1923, 1927	L
McCurdy JH	*The physiology of exercise*	1924, 1928, 1939	L
Hill AV	*The physiological basis of athletic records*	1923	M
Hill AV, Dill DB	*Muscular activity*	1926	L
Bock A	*The physiology of muscular exercise*	1931	L
Schneider EC	*Physiology of muscular activity*	1931, 39	L
Gould AG, Dye JA	*Exercise and its physiology*	1932	L
Karpovich P	*Physiology of muscular activity*	1933	L
Steinhaus A	*Chronic effects of exercise*	1933	M
Dawson P	*The physiology of physical education*	1935	L
Dill DB	*The economy of muscular exercise* *Life, heat, and altitude* *Applied physiology*	1936 1938 1939	M L M
Jokl E	*On indisposition after running* *Physical fitness*	1941 1941	M M

A partir de: Byford, 1855; Hartwell, 1887; Steinhaus, 1933; ; Dill, 1936; Berryman, 1995.

cio. En 1954 se funda el *American College of Sports Medicine* (ACSM). En 1969 se inicia la publicación de *Medicine and Science in Sports and Exercise*.

Cabe destacar los estudios de Reggie Edgerton y Phil Gollnick sobre las adaptaciones musculares al entrenamiento. También tendrán gran trascendencia los estudios de David Costill (Figs. 1.10 y 1.11), entrenador de natación y renombrado fisiólogo del ejercicio, en aspectos como las adaptaciones al entrenamiento, la fatiga y los procesos de recuperación, mientras que en fisiología cardiovascular destacarán J. H. Mitchell y Loring Rowell. Es famoso, entre otros, el estudio de Mitchell acerca del significado fisiológico del test de consumo máximo de oxígeno (Mitchell y cols., 1958). Por otro lado, Loring Rowell ha sido uno de los fisiólogos que mejor ha estudiado la respuesta cardiocirculatoria al esfuerzo en ambientes cálidos. Otros investigadores destacados fueron Jack Wilmore (Fig. 1.10) (composición corporal y condición física), George Brooks (metabolismo del ácido láctico), Eddie Coyle (Fig. 1.12) (respuesta cardiovascular al esfuerzo, termoregulación, metabolismo, efficiencia energética y adaptaciones al entrenamiento), Bill Evans (efectos del ejercicio en los ancianos), Barbara Drinkwater (masa ósea y ejercicio, osteoporosis y alteraciones alimentarias en

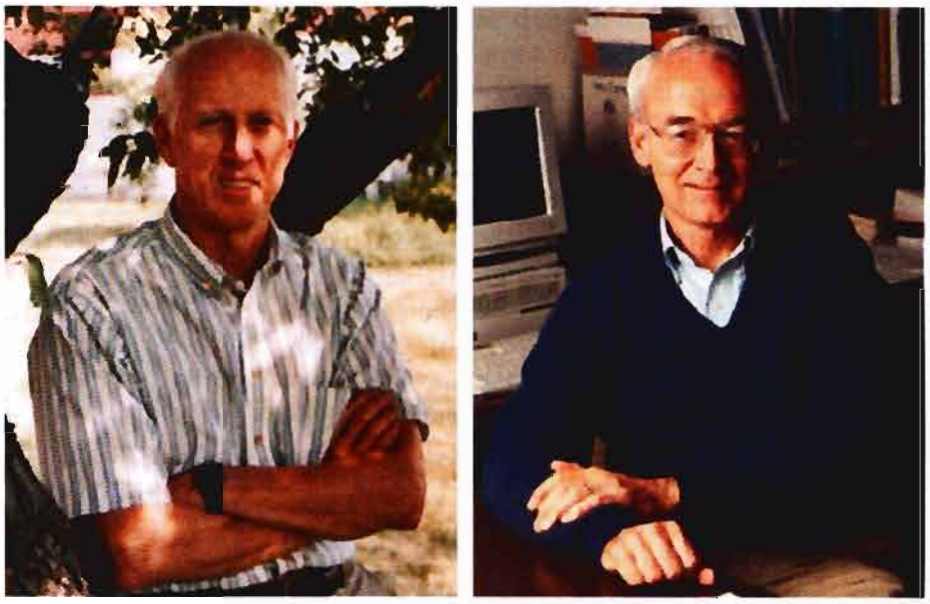


Figura 1.10. *David Costill y Jack Wilmore (derecha) figuran entre los fisiólogos del ejercicio americanos más conocidos, especialmente a raíz de la publicación de uno de los libros de texto más utilizados en la enseñanza de la fisiología del ejercicio. David Costill ha destacado por sus estudios acerca de las adaptaciones fisiológicas al entrenamiento, la fatiga y los procesos de recuperación. Especialmente importantes han sido sus trabajos sobre metabolismo durante el esfuerzo y la recuperación. Wilmore trabajó sobre todo en el análisis de la composición corporal, epidemiología y la influencia del genotipo en la respuesta fisiológica al esfuerzo.*



Figura 1.11. *David Costill en 1970, acompañado de varios sujetos experimetales durante un estudio acerca de los efectos de 10 días de carrera sobre los niveles musculares de glucógeno.*

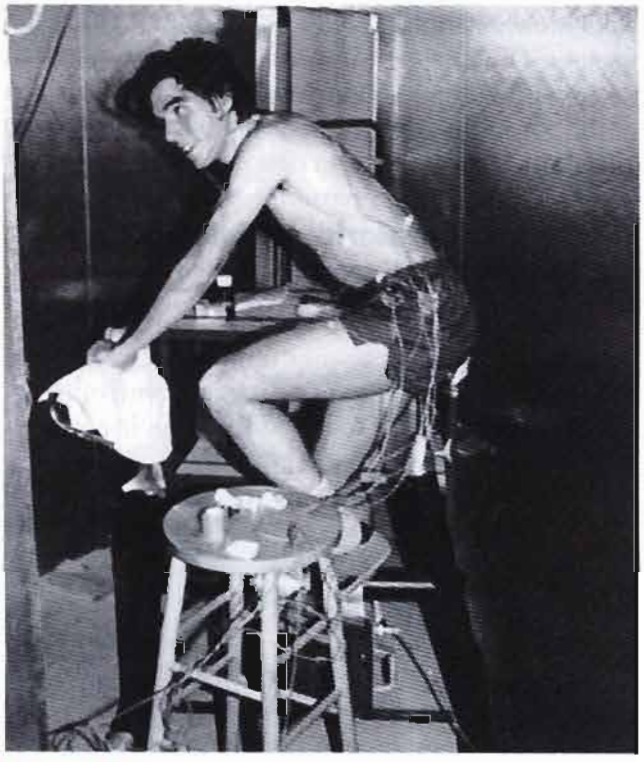


Figura 1.12. *Eddy Coyle, durante un experimento en el laboratorio de Costill.*

mujeres deportistas), Priscilla Clarkson (ejercicio y daño muscular), Steven Blair (epidemiología, influencia del ejercicio físico en la mortalidad y morbilidad, especialmente de origen cardiovascular), Thomas Cureton (autor de la monografía *Physical Fitness of Champion Athletes*, publicada en 1951), que despertó un gran interés por estudio de los deportistas de elite, y Kenneth Cooper (publicó en 1968 su libro *Aerobics*, que despertó un gran interés por el *jogging*). Otros investigadores destacados han sido John Holloszy (adaptaciones musculares al esfuerzo, metabolismo de la glucosa y regulación de la activación génica en respuesta al esfuerzo), Peter Wagner y Jerry Dempsey (fisiología respiratoria e intercambio de gases durante el esfuerzo), y Claude Bouchard (este último en Canadá, donde dirige un ambicioso proyecto de investigación, el estudio HERITAGE, sobre la influencia del genotipo en la respuesta fisiológica al ejercicio, la alimentación y el entrenamiento).

La escuela escandinava de fisiología del esfuerzo

A partir de la década de los treinta y cuarenta, la escuela escandinava de fisiología del ejercicio va

cobrando importancia tanto por la calidad como por el volumen de la investigación que emprende; no obstante, sus raíces están en el siglo XIX.

Antecedentes

El primer gran fisiólogo danés fue Peter Ludwig Panum (1820-1885), quien se formó con Claude Bernard en París y con Virchow en Alemania. En 1864 se hizo cargo de la cátedra de fisiología de la universidad de Copenhague y montó un laboratorio muy bien dotado para la época. Panum trabajó en problemas relacionados con la respiración, digestión y metabolismo. Con Panum trabajó posteriormente Christian Bohr, quien se había formado con Carl Ludwig en Alemania. Bohr (conocido por el «efecto Bohr») estudió el transporte de gases por la sangre y el intercambio de gases. El enfoque físico-matemático que confirió Bohr a sus estudios influyó definitivamente en el devenir posterior de la fisiología en Dinamarca. Su interés por el intercambio de gases fue compartido por algunos de sus discípulos, entre los que destacó August Krogh (1874-1949).

El primer Laboratorio de Fisiología del Esfuerzo de Europa

A. Krogh (Fig. 1.4) se incorporó al grupo de Bohr en 1897. El primer trabajo que realizaron apareció publicado en 1898 y versó sobre el intercambio de gases a través de la piel y en los pulmones de la rana. En 1906 Krogh y su mujer demostraron que el intercambio de gases se produce en los pulmones por difusión y no por secreción, tal y como había preconizado Bohr anteriormente. Hasta 1910, Krogh permaneció en el laboratorio de Bohr.

En 1909, Johannes Lindhard (1870-1947) obtuvo una plaza como profesor de teoría de la gimnasia en la universidad de Copenhague (Fig. 1.13). No obstante, el departamento de Lindhard carecía de laboratorio, por lo que Krogh le ofreció trabajar en su laboratorio. Conjuntamente, Linhard y Krogh realizan los primeros estudios sobre regulación de la respuesta respiratoria y circulatoria al ejercicio. Asimismo, en el laboratorio de estos científicos se desarrollaron nuevos métodos para el estudio de la difusión de gases y se diseñó un nuevo cicloergómetro que aún se sigue utilizando, el *ergómetro de Krogh* (Fig. 1.4). En 1920 Krogh recibió el premio Nobel de Medicina o Fisiología por sus estudios



Figura 1.13. *August Krogh (izquierda) y Johannes Lindhard, a la derecha (1870-1947).*

sobre la circulación capilar, tanto en reposo como durante el ejercicio.

En realidad Krogh no estaba interesado en los deportes, sólo utilizaba el ejercicio como modelo experimental para abordar problemas fisiológicos. Lindhard, debido probablemente a su vinculación con la enseñanza de fisiología para estudiantes de educación física, sí se interesó por la respuesta fisiológica al ejercicio durante la práctica de diversos deportes. Lindhard y Liljestrand (investigador del instituto Karolinska, de la universidad de Estocolmo) midieron por primera vez el gasto cardíaco en nadadores y remeros. En 1918, Liljestrand midió el consumo de oxígeno en esquiadores de fondo.

En 1920, Krogh y Lindhard demostraron que el cociente respiratorio se puede utilizar para determinar la oxidación de grasas e hidratos de carbono, tanto en reposo como durante el ejercicio.

Posteriormente, se incorporan al laboratorio Erik Hohwü-Christensen, Marius Nielsen y Erling Asmussen, quienes mantuvieron un estrecho contacto con el Laboratorio de Fatiga de Harvard. A su regreso a Escandinavia, Christensen ocupó la primera cátedra de fisiología del colegio de educación física en el *Gymnastik-och Idrottshogskolan* de Estocolmo, en 1941. Christensen publicó los primeros estudios que demostraron que el entrenamiento de resistencia no produce cambios significativos en el gasto cardíaco durante el esfuerzo submáximo,

mientras que la frecuencia cardíaca disminuye y el volumen sistólico aumenta en la proporción necesaria. Este trabajo sienta las bases científicas para la utilización de la frecuencia cardíaca durante el esfuerzo submáximo como variable indicativa de la intensidad del esfuerzo y del grado de condición física aerobia. Asimismo Christensen, conjuntamente con Hansen, publicó en 1939 los primeros estudios sobre la influencia de la dieta en el metabolismo de las grasas y de los hidratos de carbono durante el ejercicio. Demostraron que el tipo de sustrato oxidado durante el ejercicio prolongado depende de la intensidad del esfuerzo, de la duración de la dieta seguida durante los tres días precedentes y de la condición física. Christensen también participó en la primera expedición andina, para estudiar los efectos de la hipoxia sobre la respuesta cardiovascular al ejercicio. Fue el primer autor en detectar que la frecuencia cardíaca máxima y el consumo máximo de oxígeno están disminuidos en altura.

Hay que destacar también en esta época la tesis de Ole Bang, quién, bajo la dirección de Christensen, demostró que la respuesta lactatémica al esfuerzo depende de la intensidad y duración de ejercicio. Estos estudios serán desarrollados más extensamente por investigadores alemanes en la década de los setenta; no obstante, las conclusiones básicas ya fueron descritas por Bang en 1936.

Asmussen se incorporaría al laboratorio de teoría de la gimnasia de la Universidad de Copenhague, donde realiza numerosos estudios sobre las propiedades mecánicas del músculo y los primeros estudios sobre el metabolismo muscular durante el ejercicio excéntrico. Además, Asmussen realizó numerosos estudios sobre la respuesta cardiovascular durante el ejercicio en el calor y en hipoxia. Marius Nielsen y Bodil Nielsen (esta última hija de Asmussen) se dedicaron al estudio de la termorregulación durante el ejercicio.

Con Christensen se formó Per Olof Åstrand, autor de varios test para evaluación de la condición física. Fue mérito de este autor especialmente el establecimiento de los valores normativos de VO_{2max} de la población general, por edad, sexos y grado de actividad física. También fue un estudioso de los factores determinantes de la capacidad de rendimiento físico. Åstrand ocupó la dirección del Colegio de educación física en el *Gymnastik-och Idrottshogskolan* de Estocolmo en 1960, tras la jubilación de Christensen. Posteriormente, en los años sesenta, Bengt Saltin (Fig. 1.14), posiblemente el más prolífico de los investigadores en fisiología del ejercicio del siglo XX, se formaría con Christensen y

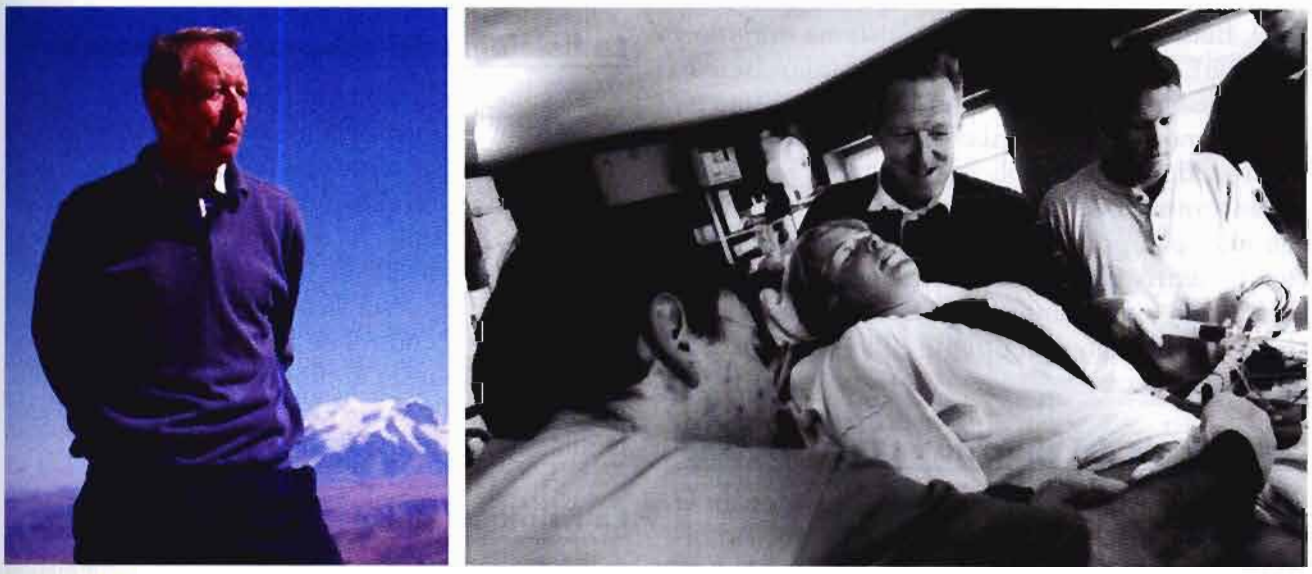


Figura 1.14. *Se licenció en Medicina en la universidad de Estocolmo en 1962. En 1964 alcanzó el grado de doctor en la misma universidad. En 1973 se trasladó a Copenhague, donde se hizo cargo de la Cátedra de Fisiología Humana en el Instituto* August Krogh. *En 1993, es nombrado director del* Copenhagen Muscle Research Centre, *de la Universidad de Copenhague, donde continúa trabajando. Ha recibido los más prestigiosos premios que se otorgan a los mejores investigadores en Dinamarca y Suecia. Asimismo recibió en el año 2002 el Premio del Comité Olímpico Internacional «*for Sport Science*». Se cuenta que un día llegó a practicar 83 biopsias musculares, ha participado en numerosas expediciones científicas y es autor de más de 350 artículos científicos y más de 150 capítulos de libro y revisiones. A la derecha, Bengt Saltin, durante un experimento llevado a cabo a 5.260 m de altura en el año 1998, en Chacaltaya (Andes Bolivianos 1998).*

Åstrand. Entre los numerosos estudios por los que es conocido Bengt Saltin deberíamos destacar: el primer trabajo en el que se analizan longitudinalmente los efectos del entrenamiento de resistencia y de la inactividad sobre el VO_{2max}, numerosos estudios sobre las adaptaciones metabólicas y cardiovasculares a distintos tipos de entrenamiento, el estudio de los efectos de la hipertermia de esfuerzo y de la deshidratación sobre la respuesta cardiovascular y metabólica al esfuerzo, el análisis de los factores limitantes del VO_{2max} y el diseño de un modelo ergométrico para el estudio de las respuestas agudas y crónicas al ejercicio, en músculo humano aislado *in situ*: el ergómetro de extensión de piernas, etc. Más recientemente, han causado gran impacto los estudios que ha llevado a cabo conjuntamente con Henriette Pilegaard sobre la regulación de la expresión génica en respuesta al ejercicio. Ha sido el director del *Copenghagen Muscle Research Centre* (CMRC), desde su fundación en 1994 hasta el año 2004. El CMRC es considerado por la comunidad científica como el centro de mayor prestigio y más innovador del mundo en el ámbito de la fisiología del esfuerzo.

Entre los investigadores escandinavos también han destacado: Niels Secher (regulación cardiovascular durante el esfuerzo y fisiología del ejercicio aplicada al remo), Erik Richter (metabolismo y transporte de glucosa, señalización intracelular de la insulina), Bente Karlund Pedersen (sistema inmune y ejercicio), Michael Kjaer (fisiología cardiovascular, metabolismo, medicina deportiva, metabolismo en los tendones), Jens Bangsbo (metabolismo, fatiga y fisiología del ejercicio aplicada al fútbol), Kent Sahlin (bioquímica del ejercicio), Bente Kiens (metabolismo y transporte de ácidos grasos durante el ejercicio), Henrik Galbo (respuesta hormonal), Paovo Komi (ciclo estiramiento acortamiento) y Keijo Häkkinen (adaptaciones neuromusculares al entrenamiento de fuerza).

La fisiología del ejercicio en Gran Bretaña

El más destacado entre los precursores de la fisiología del ejercicio en Gran Bretaña fue Archivald Hill (Fig. 1.15). Con Hill trabajó Brenda Bigland-Ritchie, que ha destacado en fisiología neuromuscular y en el estudio de los mecanismos responsables de la fatiga. No obstante, también tuvieron relación con la fisiología del ejercicio Bainbridge, Douglas y Haldane. Más recientemente han destacado, entre otros, Clyde Williams, Ronald



Figura 1.15. *Archibald Vivian Hill (1886-1977) fue premio Nobel en Fisiología o Medicina en 1922 por sus estudios describiendo los procesos responsables de la producción de calor en el músculo. Además, se le atribuye la definición del VO_{2max} y del concepto de deuda de oxígeno*

Maughan, Eric Hultman, Paul Greenhaff y Eric Newsholme.

La fisiología del esfuerzo en Alemania

Después de la segunda Guerra Mundial adquiere relevancia la escuela alemana de fisiología del ejercicio, aunque nunca ha llegado a alcanzar ni el prestigio, ni el nivel científico de la escuela escandinava. No obstante, ha tenido un papel muy importante en el desarrollo de la ergometría y de la utilización de la respuesta lactatémica al ejercicio como mecanismo de control de la intensidad del esfuerzo y de la respuesta al proceso de entrenamiento. Entre los investigadores alemanes destacaron Mader, Hollman y Heck.

La fisiología del ejercicio en otros países

En la actualidad existen grupos muy buenos en fisiología del ejercicio en Canadá (Terry Graham, Claude Bouchard, Richard Hugson y Howard Green), en Australia (Mark Febraio, Simon Gandevia y Mark Hargreaves), en Suiza (Hans Hoppeler), en italia (Rodolfo Margaria, Giovanni Cavagna, Paolo Cerretelli y Pietro Enrico di Prampero),

en Holanda (Anton Wagenmakers) y Sudáfrica (Timothy Noakes).

La fisiología del esfuerzo en España

Por lo que respecta a España, en 1919 se creó la escuela central de gimnasia militar en Toledo y por primera se dispone la dotación de un laboratorio de fisiología destinado a evaluar el valor fisiológico y científico de los ejercicios aplicados en la escuela. En el párrafo 31, sección g) de la Real Orden de 29 de diciembre de 1919 se dispuso en relación a los cometidos y objetivos de la escuela central de gimnasia «*crear una estación fisiológica o laboratorio antropo-técnico, que dictamine en cada caso sobre el valor fisiológico de los procedimientos y ejercicios practicados, como medio de que las enseñanzas se ajusten siempre a los fundamentos científicos, base de la educación física*» (Diario Oficial Nº 292, de 30 de diciembre de 1919). Este gabinete fisiológico será el primer laboratorio de fisiología del ejercicio en España y fue dirigido por el comandante médico M. Alba del Olmo, aunque funcionó más como una unidad de lo que hoy sería medicina deportiva.

En 1932, cuando Juan Negrín ocupaba la Cátedra de Fisiología de la Facultad de Medicina de la Universidad Central de Madrid, se aprobó el plan de estudios para obtener el título de profesor de educación física. Como materia principal de estos estudios se incluyó la Fisiología de la Educación Física, aprobándose una plaza de profesor permanente con dicha titulación. Desde 1932 se ha venido impartiendo la asignatura de fisiología de la educación física, más tarde llamada del ejercicio, sin interrupción hasta nuestros días, con la salvedad del período correspondiente a la Guerra Civil. A pesar de la existencia de esta materia, la producción científica fue bastante escasa hasta el inicio de la década de los noventa, en que se produce un gran auge en la producción científica española en fisiología del ejercicio debido, entre otras razones, a los siguientes fenómenos. En primer lugar, a la labor que se inició en su día en las escuelas de medicina del deporte, donde se formaron algunos de los mejores fisiólogos del ejercicio nacionales. En segundo lugar, al aumento de los puestos universitarios vinculados a la enseñanza y docencia de la fisiología del ejercicio, especialmente gracias a la creación de numerosas facultades de ciencias de la actividad física y el deporte. En tercer lugar, gracias a la interacción y colaboración de los fisiólogos del ejercicio nacionales con otros grupos de investigación mucho más avanzados, tanto nacionales como internacionales. Prueba de todo ello es la evolución creciente del número de publicaciones científicas de trabajos de investigación realizados por investigadores españoles, que son publicados anualmente en las más prestigiosas revistas científicas del área. En España los grupos más conocidos y activos se localizan, principalmente, en Barcelona, Extremadura, Granada, León, Las Palmas, Madrid, Oviedo y Pamplona.

Bibliografía

Álvarez del Palacio E. El ejercicio físico en la primera mitad del siglo XVI, la obra de Cristóbal Méndez, médico y humanista. Tesis Doctoral, León: Universidad, 1994.

Álvarez del Palacio E, Villa Vicente G. El ejercicio corporal como forma de mantenimiento físico y conservación de la salud: una perspectiva histórica. Arch Med Dep, 1996; 51:37-45.

Andersen P, Henriksson J. Capillary supply of the quadriceps femoris muscle of man: adaptive response to exercise. J Physiol, 1977; 270:677-690.

Asmussen E, Dobeln WV, Nielsen M. Blood lactate and oxygen debt after exhaustive work at different oxygen tensions. Acta Physiol Scand, 1948; 15:57-62.

Astrand PO, Rybming I. A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during sub-maximal work. J Appl Physiol, 1954; 7:218-221.

Balke B, Ware RW. An experimental study of physical fitness of Air Force personnel. US Armed Forces Med J, 1959; 10:875-888.

Bang O. The lactate content of the blood during and after exercise in man. Skand Arch Physiol, 1936; (suppl. 74):51-52.

Berryman JW. Out of many, one: A history of the American College of Sports Medicine. Champaign, Illinois: Human Kinetics, 1995.

Bock AV, Dill DB, Hurxthal LM, S LJ, Coolidge TC, Dailey ME, Henderson LJ. Blood as a physiochemical system. V. The composition and respiratory exchanges of normal human blood during work. J Biol Chem, 1927; 73:749-766.

Bruce RA. Evaluation of functional capacity and exercise tolerance of cardiac patients. Mod Concepts Cardiovasc Dis, 1956; 25:321-326.

Buller AJ, Eccles JC, Eccles RM. Differentiation of fast and slow muscles in the cat hind limb. J Physiol, 1960a; 150:399-416.

Buller AJ, Eccles JC, Eccles RM. Interactions between motoneurones and muscles in respect of the characteristic speeds of their responses. J Physiol, 1960b; 150:417-439.

Byford WH. On the physiology of exercise. Am J Med, 1855; 30:42-42.

Cooper KH. A means of assessing maximal oxygen intake. Correlation between field and treadmill testing. JAMA, 1968; 203:201-204.

Crescitelli F, Taylor C. The lactate response to exercise and its relationship to physical fitness. Am J Physiol, 1944; 141:630-640.

Chirino Godoy R. Proyecto Docente. Inédito, 1996.

Christiansen J, Douglas CG, Haldane JS. The absorption and dissociation of carbon dioxide by human blood. J Physiol (London), 1914; 48:244-271.

Dawson A. A Spirometry. En: Wilson AF (ed.). Pulmonary Function Testing. Indications and Interpretations. Orlando: Grune & Stratton, 1985. 9-41.

Déjours P. Énoncé et développment historique des principes de la physiologie respiratoire. Respiration. En: Kayser C (ed.): Physiologie. Paris: Editions Médicales Flammarion, 1963; 7-13.

Devis J, Peiró C. Nuevas persectivas curriculares en educación física: la salud y los juegos modificados. Barcelona: Inde, 1992.

Diem C. Historia de los Deportes. Barcelona: Luis Caralt, 1966.

Dill DB. The economy of muscular exercise. Physiol Rev, 1936; 16:263-291.

Douglas CG. Coordination of the respiration and circulation with variation in bodily activity. Lancet, 1927; 213:213-218.

Dubowitz V, Pearse AGE. Reciprocal relationship of phosphorylase and oxidative enzymes in skeletal muscle. Nature, 1960; 185:701-702.

Ferrero JA, García del Moral L, López Merino V. Pruebas de esfuerzo. Valencia: Generalitat Valenciana, 1989.

Hartwell EM. On the physiology of exercise. Boston Med Surg J, 1887; 116:297-301.

Hegedus J. La ciencia del entrenamiento deportivo. Buenos Aires: Stadium, 1984.

Henneman E. The size-principle: a deterministic output emerges from a set of probabilistic connections. J Exp Biol, 1985; 115:105-112.

Henneman E, Somjen G, Carpenter DO. Functional significance of cell size in spinal motoneurons. J Neurophysiol, 1965; 28:560-580.

Herbst R. Der Energieverbrauch bei sportlichen Leistungen. Sportärztetagung Frankfurt am Main, 1929. Jena: Fischer, 1929.

Hill AV. The position occupied by the production of heat in the chain of processes constituting a muscular contraction. J Physiol (London), 1911; 42:1-43.

Hill AV. The heat of shortening and the dinamic constants of muscle. Proc R Soc London Ser B, 1938; 126:136-195.

Hill AV. The dimensions of animals and their muscular dynamics. Sci Prog. 1950; 38:209-230.

Hill AV, Long CNH, Lupton H. Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. Part V. The recovery process after exercise in men. Proc R Soc Lond. 1924; 97:96-148.

Hill AV, Lupton H. Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. Q J Med. 1923; 16:135-171.

Holmgren A, Ström G. Blood lactate concentration in relation to absolute and relative work load in normal men, and in mitral stenosis, atrial septal defect and vasoregulatory asthenia. Acta Med Scand. 1959; 163:185-193.

Hollmann W. The relationship between pH, lactic acid, potassium in the arterial and venous blood, the ventilation (VoW) and pulse frecuency during increasing spiroergometric work in endurance-trained and untrained persons. Pan-American Congress for Sports Medecine Chicago, 1959.

Jervell O. Investigation of the concentration of lactic acid in blood and urine under physiologic and pathologic conditions. Acta Med Scand. 1928; (suppl. 24):1-135.

Lahiri S. Historical perspectives of cellular oxygen sensing and responses to hypoxia. J Appl Physiol. 2000; 88:1467-1473.

Laín Entralgo P. Historia de la Medicina. Barcelona: Salvat, 1978.

Leger L, Boucher R. An indirect continuous running multistage field test: the Universite de Montreal track test. Can J Appl Sport Sci. 1980; 5:77-84.

Legido Arce JC. Historia de la Fisiología del Ejercicio. En: López Chicharro J, Fernández Vaquero A (eds.). Fisiología del Ejercicio. Madrid: Editorial Médica Panamericana, 1995, 1-6.

López Calbet JA. La historia de la Fisiología del Ejercicio. En: López Calbet JA, Dorado García C (eds.). Avances en ciencias del deporte. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 1999.

Mellerowicz H, Smodlaka VN. Technical development of the ergometer. En: Mellerowicz H, Smodlaka VN (eds.). Ergometry Basics of Medical Exercise Testing. Munich: Urban & Schwarzenberg, 1981, 31-45.

Mitchell JH, Sproule BJ, Chapman CB. The physiological meaning of the maximal oxygen intake test. J Clin Invest. 1958; 37:538-547.

Owles WH. Alterations in the lactic acid content of the blood as a result of ligth exercise and associated changes in the CO_2-combining power of the blood and in the alveolar CO_2 pressure. J Physiol Lond. 1930; 69:214-237.

Padykula HA, Herman E. The specificity of the histochemical method for adenosine triphosphatase. J Histolchem Cytochem. 1955; 3:170-183.

Robinson S, Edwards HT, Dill DB. New records in human power. Science. 1937; 85:409-410.

Robinson S, Harmon PM. The lactic acid mechanism and certain properties of the blood in relation to training. Am J Physiol. 1941; 132:757-769.

Rothschuh KE. History of Physiology. Nueva York: Krieger Publishing Company 1973.

Rowell LB, O'Leary DS, Kellogg DL. Handbook of Physiology. Exercise: Regulation and Integration of Multiple Systems, vol. 12. Bethesda, MD: American Physiological Society, 1996.

Schenk P. Der einfluß sportlicher arbeit auf den körperhaushalt. Münch Med Wochenschr. 1925; 72:2050.

Steinhaus AH. Chronic effects of exercise. Physiol Rev. 1993; 13:103-147.

Van Dalen DB, Bennet BL. Physical education in education for Greek Individualism. En: A World History of Physical Education. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1971a, 32-67.

Van Dalen DB, Bennet BL. Physical education in education for survival. En: A World History of Physical Education. Englewood Cliffs: Prentice Hall 1971b, 3-8.

Wasserman K, Whipp BJ, Koyl SN, Beaver WL. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. J Appl Physiol. 1973; 35:236-243.

Wilmore J, Costill DL. Physiology of Sport and Exercise. Champaign IL: Human Kinetics, 1999.

Yu PN, Bruce RA, Lovejoy FW Jr., Mc DM. Variations in electrocardiographic responses during exercise; studies of normal subjects under unusual stresses and of patients with cardiopulmonary diseases. Circulation. 1951; 3:368-376.