



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
IZTACALA**



BIOLOGÍA

TESIS DE LICENCIATURA

**EFFECTO DEL EJERCICIO FÍSICO DE RESISTENCIA
SOBRE LAS PROPIEDADES CONTRÁCTILES DEL
MÚSCULO EXTENSOR LARGO DE LOS DEDOS
(EDL) DE LA RATA MACHO.**

Pineda Escalona Lezly.

Asesora. Segura Alegría Bertha.

Marzo 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A MI PADRE.

Gracias por ser el ángel que ilumina cada momento de mi vida,
Gracias por cada uno de los momentos que pasaste a mi lado,
Gracias por todas tus enseñanzas,
Gracias por todos tus consejos,
Gracias por todos tus regaños,
Gracias por el esfuerzo que realizaste para que nunca nada me faltara,
Gracias por todas las alegrías,
Gracias por todos esos malos momentos,
Gracias por cuidarme,
Gracias por consentirme
Gracias por tratar de hacer de mi una mejor persona,
Gracias por tu humildad,
Gracias por tu perseverancia,
Gracias por ser la persona que fuiste,
Gracias por que a pesar de todo, siempre fui para ti "tu reina".
Gracias por haber sido el mejor padre del mundo.
Y aunque en este momento no estés físicamente conmigo, siempre estarás en
mi mente y en mi corazón.
Este pequeño logro y cada logro de mi vida será gracias a ti; tratare de ser la
mujer que siempre quisiste que fuera.

ÍNDICE.

RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	5
ANTECEDENTES	13
OBJETIVO	15
MATERIALES Y MÉTODOS	16
RESULTADOS	20
DISCUSIÓN	26
CONCLUSIONES	31
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	32

“EFECTO DEL EJERCICIO FÍSICO DE RESISTENCIA SOBRE LAS PROPIEDADES CONTRÁCTILES DEL MÚSCULO EXTENSOR LARGO DE LOS DEDOS (EDL) DE LA RATA MACHO”

RESUMEN

Se ha reportado previamente, que la proporción de fibras musculares de los tipos I, IIa y IIb contenidas en un músculo, está determinada genéticamente y confiere a cada músculo ciertas propiedades contráctiles distintivas, que se han asociado con la función y la ubicación de dicho músculo en el cuerpo de un organismo. No obstante, esta proporción puede modificarse cuando el organismo es sometido a ejercicio continuo; por tal razón el objetivo de este trabajo fue conocer las modificaciones en la respuesta contráctil del músculo EDL de ratas macho, jóvenes, sometidas a nado forzado durante 3 semanas. Nuestros resultados mostraron que los parámetros morfométricos (peso corporal, peso y longitud del músculo EDL) no se modificaron significativamente en los animales sometidos a nado forzado; no obstante las propiedades contráctiles (tensión desarrollada en respuesta a la estimulación con respuestas crecientes) mostraron una disminución significativa en los animales sometidos a ejercicio. Lo anterior nos permite sugerir que el nado forzado al cual se sometieron los animales, durante tres semanas continuas, provocó la transformación de las fibras musculares de contracción rápida predominantes en los músculos de ratas control, en fibras musculares de sacudida lenta o intermedia en el músculo EDL de las ratas sometidas a ejercicio.

Esta hipótesis se fortalece, porque los diámetros de las fibras musculares medidos en los músculos procedentes de animales ejercitados, fueron menores que los de los músculos de ratas control.

Palabras clave. *Adaptación, EDL, ejercicio, fibras, músculo.*

ABSTRACT

It has been previously reported that the proportion of muscle fiber type I, IIa and IIB, contained in a muscle is genetically determined and gives each muscle contractile properties distinguishing, associated with the function and location of muscle in the body. However, this percentage can be changed when the body is subjected to continuous exercise, for this reason, the goal of this study was to determinate the changes in muscle EDL contractile in young rats subjected to forced swimming by 3 weeks. Our results showed no significant change in the parameters morphometric (body weight and muscle weight); however, contractile properties (stress developed as a response to stimulation with increasing responses) showed significant decrease in animals subjected to the exercise. This allows suggest that the forced swim which the animals are subjected during three consecutive weeks provoked the transformation of fast twitch muscle fibers predominate in muscle's rats control, in shaking at slow or intermediate muscle fibers in the muscle EDL from rats subjected to exercise. This hypothesis is strengthened because muscle fiber diameters measured in the muscles from animals exercised, were lower than those of the muscles of control rats.

Keywords. *Adaptation, EDL, exercise, fibers, muscle.*

INTRODUCCIÓN

Todas las actividades físicas, tales como caminar, correr o nadar, están relacionadas con la contracción muscular. Los músculos esqueléticos se caracterizan por transformar la energía química (ATP) en energía mecánica, capaz de producir trabajo o desarrollar tensión.

El tejido muscular posee cuatro propiedades particulares que le permiten contribuir a la homeostasis: excitabilidad eléctrica (lo cual significa que recibe del sistema nervioso la información, de naturaleza electro-química, que inicia su actividad); contractibilidad (característica esencial que le permite acortarse o desarrollar tensión); extensibilidad (permite que este tejido se alargue más allá de su longitud de reposo) y plasticidad (que le brinda la posibilidad de cambiar y adaptarse a las condiciones impuestas por el medio ambiente). La capacidad de contraerse es esencial, porque permite al músculo (esquelético, cardíaco o liso) producir movimientos corporales, estabilizar las posiciones del cuerpo, impulsar la sangre hacia otros tejidos, almacenar y movilizar sustancias en el organismo, así como generar calor (Barbany, 2002).

El músculo esquelético, que es nuestro objeto de estudio, está compuesto por numerosas células, llamadas fibras musculares por su forma alargada. Es importante señalar que tanto cada una de ellas como el músculo entero están rodeados de tejido conectivo; además cada músculo se encuentra profusamente irrigado y cuenta con inervación sensitiva y motora.

La fibra muscular esquelética constituye la unidad estructural y funcional de este tejido, son células multinucleadas de forma cilíndrica y longitud variable; las fibras musculares adultas poseen alrededor de 100 núcleos situados en la periferia, justo debajo del sarcolema (membrana celular) se encuentran miles de pequeñas invaginaciones del sarcolema denominados túbulos transversos (túbulos T), los cuales penetran desde la superficie hacia el centro de cada fibra. El sarcoplasma contiene las miofibrillas (orgánulos contráctiles del músculo esquelético), cuyo diámetro es de alrededor de 2 μm y se extienden a lo largo de toda la fibra muscular (sus prominentes estriaciones hacen que toda la fibra parezca estriada), se encuentran rodeadas por un sistema de sacos

membranosos llamado retículo sarcoplasmático (RS). Las dilataciones saculares terminales del retículo sarcoplasmático, denominadas cisternas terminales, se ubican a ambos lados de cada túbulo T y en conjunto constituyen una tríada (figura 1).

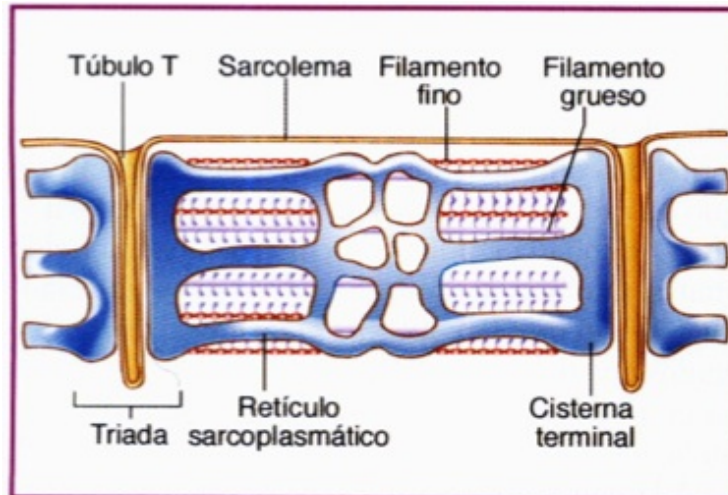


Figura 1. Disposición de los túbulos T y del retículo sarcoplásmico alrededor de las miofibrillas (López, 2006).

Además el sarcoplasma posee una cantidad sustancial de glucógeno, mitocondrias y una proteína denominada mioglobina (cuya función es proveer de oxígeno a la fibra muscular) se extienden en hileras a través de la fibra y se encuentran estratégicamente colocadas cerca de las proteínas musculares, a las cuales proporcionan el ATP requerido durante la contracción (figura 2; Fox, 1992).

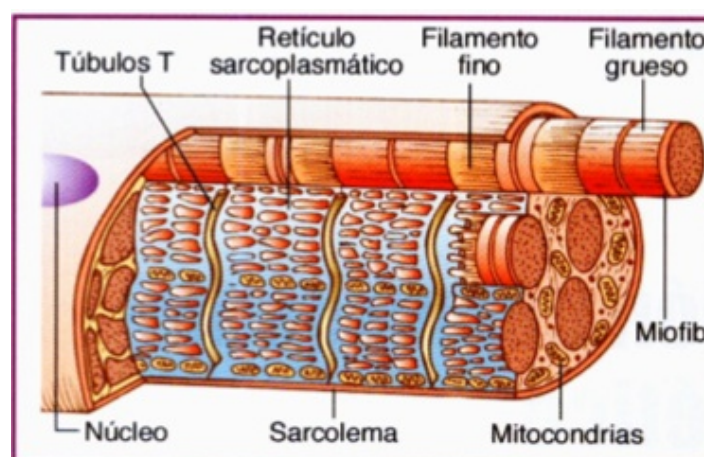


Figura 2. Dibujo esquematizado de una fibra muscular en la que se aprecia la disposición de las miofibrillas y de las diferentes estructuras celulares (López, 2006)

Dentro de las miofibrillas se encuentran estructuras más pequeñas, denominadas miofilamentos (los cuales están directamente involucrados en el

proceso contráctil); los filamentos finos (8 nm de diámetro y 1-2 μ m de longitud) y los filamentos gruesos (16 nm diámetro y 1-2 μ m de longitud). Existen dos filamentos finos por cada filamento grueso los cuales se superponen en ciertas regiones, están organizados en compartimentos llamados sarcómeros (unidades funcionales básicas de una miofibrilla), los cuales se encuentran separados por un material denso en forma de placa denominadas líneas Z. La porción oscura central del sarcómero se denomina banda A, ésta recorre toda la longitud de los miofilamentos gruesos y una parte de los filamentos finos. La banda I es un área clara y de menor densidad, en la cual se encuentra la porción restante de los filamentos finos. En la parte central de ésta se ubica la línea Z. En el centro de cada banda A (filamentos gruesos) se encuentra una banda H. Las proteínas de sostén que soportan a los filamentos gruesos en el medio de cada zona H forman la línea M (figura 3).

A nivel molecular, las miofibrillas están compuestas por tres tipos de proteínas:

1. Proteínas contráctiles, que participan directamente en la contracción muscular.
2. Proteínas reguladoras, que contribuyen a activar y desactivar el proceso contráctil.
3. Proteínas estructurales, que mantienen a los filamentos gruesos y finos en la alineación adecuada, dan elasticidad y extensibilidad a la miofibrilla, y unen las miofibrillas al sarcolema y a la matriz extracelular.

Las proteínas contráctiles, presentes en el músculo esquelético son de dos tipos: la miosina (filamentos gruesos) y la actina (filamentos finos). Los filamentos de actina son semejantes a dos hileras de cuentas torcidas en una doble hélice. Cada una de estas “cuentas” corresponde a una molécula de actina globular (actina G), las cuales se polimerizan para formar una cadena de actina filamentosa (actina F). Además los filamentos delgados contienen otras dos proteínas: la tropomiosina, filamento proteínico de gran longitud, ubicado en el canal formado por las dos hileras de actina F, al torcerse y la troponina, pequeño complejo molecular unido al filamento de tropomiosina a intervalos discretos (figura 3). La tropomiosina es una proteína estructural, mientras la troponina es reguladora (Tortora, 2009).

Los filamentos gruesos están formados por alrededor de 250 moléculas de miosina. En cada molécula de miosina se observa una cola de alrededor de

150 nm y una cabeza globular (figura 3), que actúa como una poderosa ATPasa, lo cual significa que puede hidrolizar enzimáticamente al ATP para producir ADP y fosfato inorgánico (Pi). La cola de la miosina está dirigida hacia la línea M y en su porción terminal con una cabeza, orientada hacia el exterior del eje siguiendo un patrón en espiral, que se extiende hacia alguno de los seis filamentos finos que rodean al filamento grueso (figura 2; Huxley, 2007).

En el músculo relajado, la unión de la miosina a la actina se encuentra bloqueada, porque los sitios de unión están cubiertos por hebras de tropomiosina; las cuales se mantienen en su lugar por medio de moléculas de troponina.

Además de las proteínas contráctiles y reguladoras, el músculo posee alrededor de una docena de proteínas estructurales, que contribuyen a la disposición lineal, estabilidad, elasticidad y extensibilidad de las miofibrillas; Entre las cuales se encuentran: la titina, miomesina, nebulina y distrofina (Tortora, 2009).

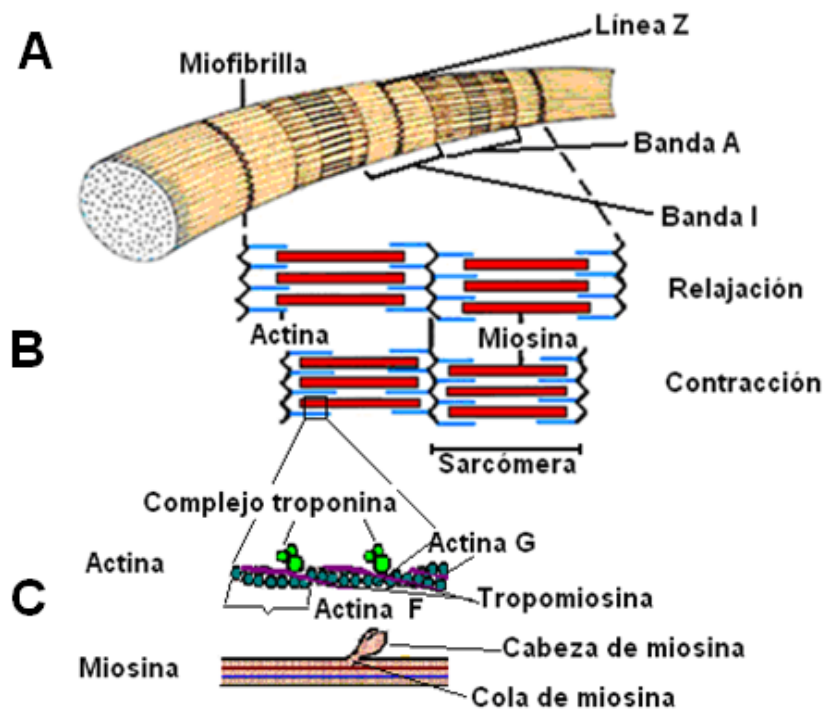


Figura 3. La miofibrilla presenta estriaciones visibles al microscopio (A). Éstas se corresponden con la presencia de las proteínas actina y miosina, que se organizan interdigitando una sobre otra (B). La actina está constituida por cadenas de actina G, tropomiosina y el complejo troponina que cubre al sitio activo afín a la miosina; la miosina presenta a intervalos regulares prolongaciones llamadas cabezas, que se unen al cuerpo de la proteína mediante una cola (C) (Segura, en prensa).

Las fibras musculares se contraen tras el estímulo de un nervio motor. Las neuronas motoras (motoneuronas) se localizan en el asta ventral de la médula espinal y se extienden hacia la periferia mediante sus axones agrupados en los nervios periféricos que se dirigen hacia los músculos. El nervio entra en el músculo y se ramifica en el perimysio, para posteriormente introducirse en el endomisio y conectarse con la fibra muscular. En la zona de unión denominada placa motora. Cada una de las motoneuronas estimula a un número determinado de fibras musculares. La unión de las fibras musculares con las fibras nerviosas, se denomina unidad motora (figura 4; Kernell, 2000).

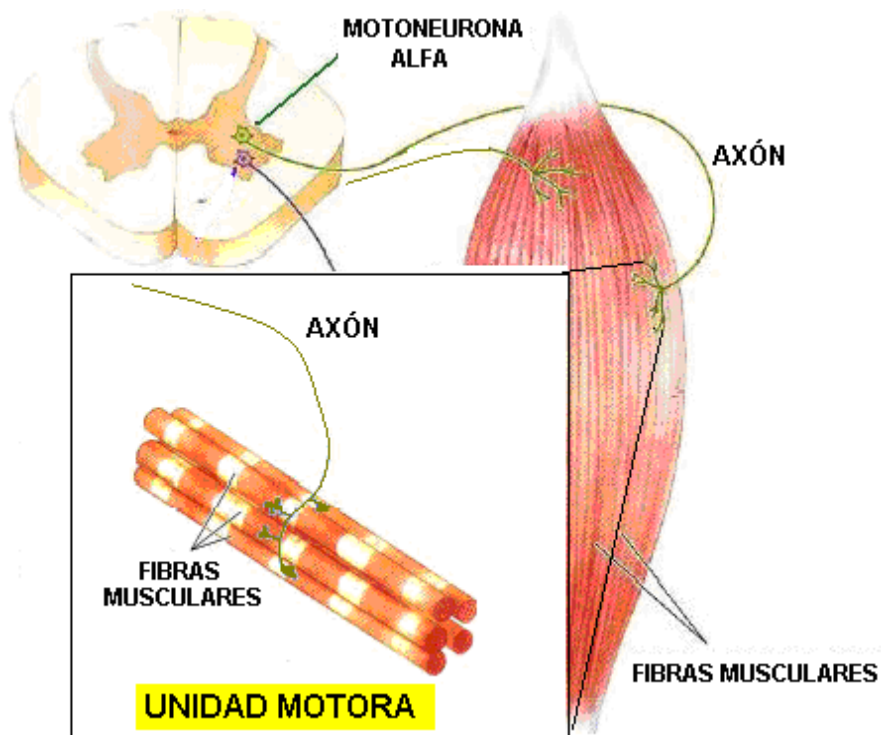


Figura 4. La unidad motora está constituida por un el axón de una motoneurona alfa y todas las fibras musculares que éste inerva (Segura, en prensa).

La contracción de las fibras musculares se produce en respuesta a los potenciales de acción originados y transmitidos por el sistema motor desde las motoneuronas alfa espinales hasta la placa motora, donde se libera la acetilcolina almacenada en las vesículas del elemento presináptico, hacia el espacio intersináptico. La acetilcolina se difunde a través de este espacio y se une a receptores específicos del sarcolema de la fibra muscular. Como consecuencia se producen modificaciones en la permeabilidad iónica del sarcolema, por el ingreso de sodio y el correspondiente cambio de potencial de membrana; el

cambio en la polaridad de la membrana puede generar potenciales de acción, conducidos a través del sarcolema por toda la fibra muscular. Los potenciales de acción son conducidos por los túbulos T, donde se localiza el receptor de dihidropiridina (DHPR, por sus siglas en inglés), que a su vez provoca que el receptor de rianodona (RYR, por sus siglas en inglés) ubicado en el retículo sarcoplasmático libere el Ca^{2+} almacenado dentro de esta estructura. El Ca^{2+} se difunde libremente sin gasto energético, a través del sarcoplasma hasta las miofibrillas, iniciando el proceso de contracción. En la miofibrilla, el Ca^{2+} se fija a la subunidad TnC (se une al Ca^{2+}) de la troponina (cada TnC puede fijar 2 Ca^{2+} que se unen a otros 2 ya permanentemente combinados con la misma), formando el complejo Ca^{2+} /troponina C, cuya presencia provoca: 1) Cambio de la conformación de la TnT (se une a la tropomiosina); el cual causa modificaciones estructurales de la tropomiosina, desplazándola de su posición inicial de reposo dejando al descubierto los sitios activos de la actina. 2) Inhibición de la TnI (es la que se une a la actina); lo que permite la actividad ATPasa de las cabezas de miosina. 3) Formación de puentes cruzados entre filamentos gruesos y delgados (actina-miosina) sin gasto energético alguno. 4) Acción de “bisagra”, torsión del cuello de la miosina; la formación de puentes cruzados no produce disminución alguna de la longitud del sarcómero; por lo que es necesario que los puentes cruzados empujen a los filamentos delgados de cada lado hacia el centro del sarcómero, acercando las líneas Z adyacentes y disminuyendo la distancia entre ellas, dicha acción se debe a que el cuello de la miosina cuenta con uno o dos lugares susceptibles de torsión o giro en bisagra, con un gasto energético proveniente del ATP hidrolizado por la ATPasa de las cabezas de miosina. 5) Separación de la actina y la miosina, debido a que el ATP, presente en el medio se une a la cabeza de miosina. En esta condición es posible la formación de nuevos puentes cruzados, con la única condición de que existan Ca^{2+} y ATP en el medio. Si esto ocurre el acortamiento del sarcómero es mayor, debido a que cuando el enlace formado por la actina y miosina se rompe, inmediatamente se lleva a cabo la formación de un nuevo enlace entre la cabeza de la miosina y otro sitio activo de la actina (en las proximidades del anterior, aunque más cercano a la línea Z). Para que cese la activación del músculo y la fibra pueda relajarse, es necesario extraer todo el Ca^{2+} que se había difundido durante el proceso de activación y esto

ocurre porque existe una bomba metabólica que recaptura dicho ión desde el sarcoplasma hasta el interior del retículo sarcoplasmático. Al disminuir la concentración de Ca^{2++} el sarcoplasma restituye las conformaciones en reposo de TnC, TnT, TnI y la posición inicial de la tropomiosina, la cual vuelve a bloquear los lugares activos de la actina, reapareciendo la activación inhibitoria sobre la ATPasa de la miosina que imposibilita la contracción (Huxley, 2007).

Los diversos tipos de contracción muscular se clasifican de acuerdo a las modificaciones de la longitud del músculo, la velocidad de contracción y la fuerza (Astrand, 2010).

- 1) Contracción isotónica (concéntrica). En este tipo de contracción, el músculo se acorta a medida que desarrolla una tensión.
- 2) Contracción isométrica. El músculo desarrolla una tensión, pero no modifica su longitud.
- 3) Contracción excéntrica. El músculo se encuentra estirado más allá de su longitud de reposo al efectuar la contracción.

Aunque el mecanismo de la contracción es común en todos los músculos, estos, se encuentran formados por fibras musculares con diferentes propiedades mecánicas y contráctiles que van de acuerdo a su función. En los mamíferos, estas diferencias son fácilmente observables por su coloración.

Los músculos rojos son músculos posturales, de contracción lenta, capaces de mantener una contracción de moderada intensidad durante períodos de tiempo prolongados, aunque con una velocidad y fuerza máxima de contracción reducidas. Tienen mayor resistencia a la fatiga.

Los músculos blancos son músculos de acción esporádica, de contracción rápida, con aspecto pálido; se contraen con elevada velocidad y fuerza de contracción, pero se fatigan rápidamente, por lo que no pueden realizar una acción sostenida (Hüter-Becker, 2006).

Las diferencias de los músculos en su color externo y su comportamiento funcional se deben a su composición histológica, sus propiedades contráctiles y a las fuentes metabólicas mediante las cuales generan ATP las fibras que los constituyen. De acuerdo a lo anterior, las fibras se dividen en tres tipos principales (Tortora, 2009).

- 1) Fibras oxidativas lentas (OL). Son las más pequeñas en diámetro, se ven de color rojo oscuro por sus grandes cantidades de mioglobina y muchos capilares sanguíneos, presentan un metabolismo predominantemente aerobio debido a su alto contenido de mitocondrias. Se denominan “lentas” porque la ATPasa de sus cabezas de miosina hidrolizan el ATP en forma relativamente lenta, están inervadas por pequeñas neuronas del tipo motoneuronas α -2, son mas fácilmente excitables (menor umbral), tienen una capacidad glucolítica baja (ácido láctico), su contracciones duran de 100 a 200 mseg y tardan más en desarrollar la tensión máxima; sin embargo, son muy resistentes a la fatiga y capaces de sostener contracciones prolongadas por horas. Estas fibras están adaptadas al mantenimiento de la postura y a la realización de actividades aeróbicas de resistencia.
- 2) Fibras oxidativas-glucolíticas rápidas (OGR). Poseen un diámetro intermedio, contienen grandes cantidades de mioglobina y capilares sanguíneos (también presentan un rojo pálido), generan cantidades considerables de ATP mediante metabolismo aeróbico, debido a la presencia de mitocondrias; sin embargo, dado que cuenta con una alta reserva intracelular de glucógeno, también generan ATP mediante glucólisis anaeróbica. Se consideran “rápidas” debido a que las ATPasa de sus cabezas de miosinan hidrolizan ATP de tres a cinco veces más rápido que las fibras OL, provocando una mayor velocidad de contracción, pueden alcanzar su máxima tensión a un menor tiempo que las fibras OL, pero con una duración menor de 100 mseg. Estas fibras contribuyen a actividades tales como caminar.
- 3) Fibras glucolíticas rápidas (GR). Poseen un diámetro mayor que los otros tipos de fibras, cuentan con una mayor cantidad de miofibrillas, por ende generan contracciones más potentes. Debido a la poca presencia de mitocondrias, mioglobina y capilares sanguíneos muestran un color “blanco”. Estar inervadas por neuronas del tipo motoneuronas α -1 de gran calibre por lo tanto presentan un umbral mayor; contienen grandes cantidades de glucógeno y producen ATP principalmente por glucólisis, las fibras GR se contraen fuerte y rápidamente. Están adaptadas a la realización de movimientos anaeróbicos intensos de corta duración.

Los músculos presentan una variedad y equilibrio de estos tipos de fibras en su composición. En una unidad motora particular, todas las fibras musculares son del mismo tipo. Por otra parte, las diferentes unidades motoras de un músculo se reclutan con un orden específico, dependiendo de la necesidad. Por ejemplo, si una serie de contracciones débiles son suficientes para llevar a cabo una tarea, sólo se activarán las fibras OL, si es necesario una fuerza mayor, las unidades motoras de las fibras OGR también se reclutarán. Por último, si se requiere de una fuerza “máxima” entonces también se llevará a cabo el reclutamiento de las unidades motoras de las GR (Barclay, 1996.).

La proporción de fibras musculares (OL, OGR, GR) de un mismo músculo o grupo muscular es distinta entre los diversos individuos y está determinada por una serie de factores complejos, como lo son: la genética, la edad, el sexo, los niveles hormonales y ciertos estímulos mecánicos externos (por ejemplo el ejercicio).

ANTECEDENTES

A pesar de que la realización continua de ejercicio físico no aumenta la cantidad total de fibras musculares, las características metabólicas y contráctiles de estas, si se modifican (dentro de ciertos límites). La práctica continua de un ejercicio físico es un estímulo para la especialización de las fibras musculares, que les permite adaptarse a esa actividad. Es importante resaltar el papel crítico que tiene la adaptación de las fibras musculares a cierta actividad física aún en los días iniciales de un programa de ejercicio físico (Cadeau y cols. 1994; Green y cols. 1992), tal vez debido a que el entrenamiento breve causa un movimiento inicial en el control neuromuscular y/o cardiovascular que mejora la utilización de las fibras, el metabolismo y la distribución del flujo sanguíneo (Terjung, 1998).

El músculo esquelético tiene la capacidad de renovar por completo su tejido contráctil en el plazo de dos semanas, todo depende del tipo de trabajo al que se somete el músculo (Drucker, 2005).

Los ejercicios que requieren el desarrollo de una fuerza “máxima” por un periodo breve de tiempo (anaeróbico) como las carreras de velocidad o levantar pesas; producen un aumento de tamaño y fuerza de las fibras GR,

debido a una mayor síntesis de filamentos gruesos y finos, dando como resultado un agrandamiento (hipertrofia) muscular; para desarrollar hipertrofia muscular basta someter al músculo a unas 5 o 6 contracciones máximas o submáximas al día en un lapso de 2 semanas (Drucker,2005).

Sin embargo, el entrenamiento de resistencia (aeróbicos) como correr o nadar, causa un aumento de la concentración de enzimas mitocondriales, así como el aumento del número y volumen de mitocondrias en todos los tipos de fibras en un periodo de 3 semanas. Provocando la transformación de algunas fibras GR en OGR (Rose, 2009).

Estos ejercicios también generan cambios cardiovasculares y respiratorios que hacen que los músculos reciban mayor oxígeno y nutrientes sin incrementar la masa muscular (Rodríguez, 2007).

El nado representa un importante ejercicio físico de resistencia. La acción de desplazarse en el medio acuático es posible gracias a contracciones voluntarias, en su mayoría concéntricas, que generan fuerzas propulsivas capaces de vencer la resistencia de la fricción acuática; esto a su vez, provoca una sobrecarga muscular, con un estímulo neurometabólico importante. Otro aspecto a destacar se refiere a la relación de la fuerza y la velocidad de contracción del sistema muscular, así como su relación con el reclutamiento de los distintos tipos de fibras musculares que componen el músculo. Durante la natación a bajas velocidades, son las fibras OL las que generan la fuerza propulsiva; a medida que aumenta la fuerza y la velocidad se van reclutando las fibras OGR, para finalmente ser involucradas las fibras GR, ante los esfuerzos máximos (Hüter-Becker, 2006).

Además, en esta actividad intervienen numerosos músculos, por ejemplo, la patada descendente se realiza fundamentalmente por la acción de los músculos psoasíaco y recto anterior. La extensión de la rodilla se realiza por la contracción del cuádriceps, mientras que en la flexión dorsal intervienen el tibial anterior y el músculo extensor largo de los dedos (extensor digitorum longus; EDL; Camiña, 2008).

El EDL tiene su origen en el cóndilo lateral de la tibia, cara anterior del peroné y membrana ínter ósea, es innervado por el nervio peroneo profundo. Cuenta con inserción en las falanges media y distal de los dedos 2 a 5, tiene la acción de dorsiflexionar el pie a nivel de la articulación de tobillo y extiende las falanges

media y distal de cada dedo a nivel de las articulaciones interfalángicas y la falange proximal de cada dedo a nivel de la articulación metatarsofalángica (Astrand, 2010).

En la rata el músculo EDL presenta una composición de: 42% fibras GR, 54% fibras OGR y 4% en fibras OL. Lo cual le confiere características contráctiles de músculo de sacudida rápida, fatigable. No obstante, tanto la proporción de fibras, como las características contráctiles de éste músculo pueden modificarse después de un período de entrenamiento de resistencia (Rankin, 1998).

Por lo anterior en el presente trabajo he planteado los siguientes objetivos

OBJETIVO GENERAL

Conocer el efecto del nado forzado, sobre las características morfométricas y sobre las propiedades contráctiles del músculo EDL, de rata macho joven.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Establecer los cambios, provocados por el nado forzado, sobre los pesos corporal y muscular (músculo EDL) de la rata.
2. Analizar los posibles cambios provocados por nado forzado, sobre la respuesta contráctil del músculo EDL de la rata, al ser estimulado con frecuencias crecientes.
3. Establecer, si existe correlación entre los tipos de fibras presentes en el músculo EDL de la rata con las características contráctiles del mismo.

MATERIALES Y METODOS.

Se utilizaron 18 ratas macho (*Rattus norvegicus*), de la cepa Wistar, con un peso promedio inicial de 250g, que fueron proporcionadas por el bioterio de la FES-Iztacala. Éstos tuvieron libre acceso al agua y al alimento y se mantuvieron bajo las mismas condiciones de temperatura, humedad y período luz-oscuridad durante toda la fase experimental.

Al inicio del experimento los animales fueron divididos al azar en dos grupos:

El control (C, n=9), que se mantuvo sedentario, en jaulas individuales durante todo el experimento, y el ejercitado (E, n=9) cuyos miembros también se alojaron en jaulas individuales, pero se sometieron a un plan de ejercicio durante tres semanas (fig. 5 A).

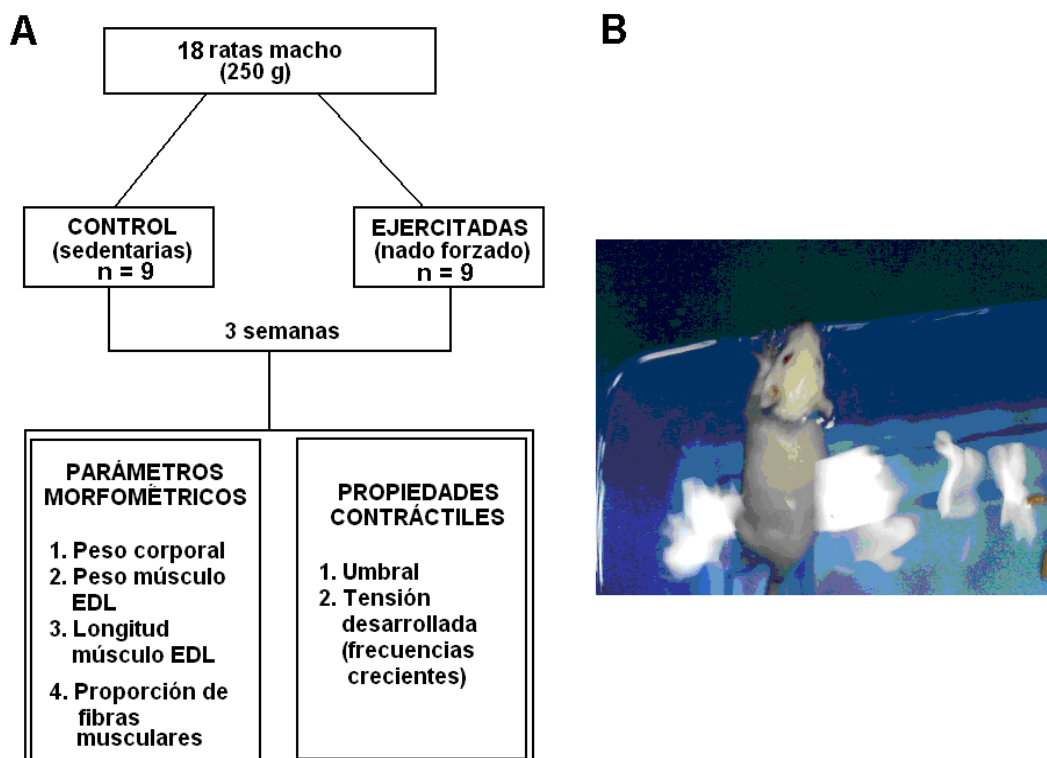


Figura 5. Diagrama de flujo que muestra la distribución de animales control y ejercitado, así como los parámetros evaluados (panel A). También se observa la vista parcial de la tina en la que se efectuó el nado forzado de las ratas macho ejercitadas (panel B).

El ejercicio consistió en someter a los animales a nado forzado (sin permitir que flotarán), en una tina con dimensiones de 40X61X39 cm de alto, largo y ancho, respectivamente, durante 30 minutos por día, por un período de tres semanas (fig. 5B).

ACTIVIDAD CONTRÁCTIL DEL MÚSCULO EDL.

El efecto del ejercicio sobre el desempeño muscular se evaluó, *in situ*, en el músculo extensor largo de los dedos (EDL). Para ello, una vez concluido el período de entrenamiento mediante nado forzado, los animales fueron pesados y anestesiados con uretano, aplicado por vía subcutánea (1.6 g/ Kg. de peso);

posteriormente el músculo EDL fue expuesto mediante incisiones longitudinales en la piel de ambas extremidades posteriores, teniendo especial cuidado en mantener intacta la circulación sanguínea durante todo el experimento (fig. 6).

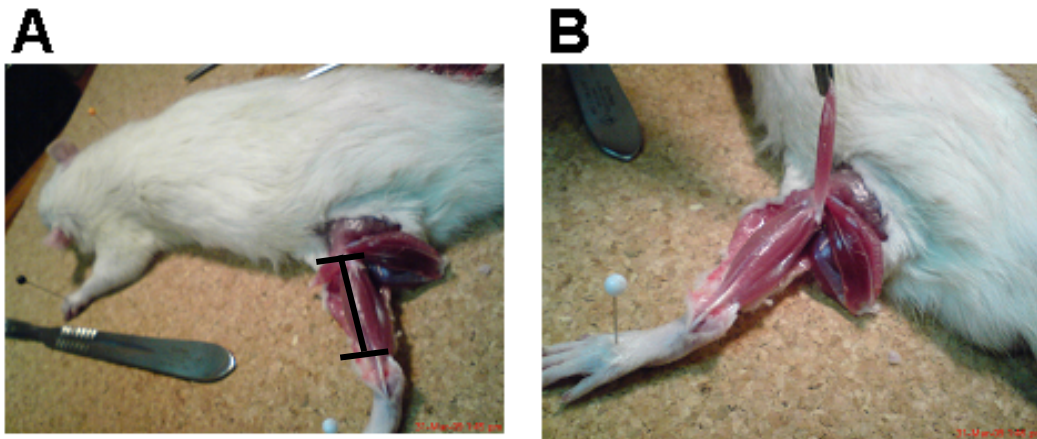


Figura 6. Localización (A) y disección (B) del músculo EDL, en la extremidad posterior izquierda de la rata. La longitud de reposo es la distancia que existe entre el inicio de los tendones proximal y distal (línea marcada sobre el músculo en A), antes de separar el músculo.

El tendón localizado en la parte distal del músculo en estudio fue atado con un hilo resistente e indeformable y antes de separarlo de la extremidad se midió su longitud de reposo (L_r). Luego de cortar el tendón distal, el músculo EDL fue enganchando, mediante el hilo indeformable, a un miógrafo isométrico (Miógrafo B, Narco Biosystems), conectado a su vez a un amplificador (Tipo 7070, Narco Biosystems), y a un fisiógrafo de escritorio (Modelo DMP 4B, Narco Biosystems), con el objeto de efectuar el registro en papel de la actividad contráctil del músculo en estudio. Cabe señalar que para evitar la aparición de artefactos de índole mecánico durante los registros, tanto la pelvis como la parte distal de la tibia fueron fijadas firmemente a la tabla de disección, con alfileres de acero inoxidable. Los músculos se mantuvieron en un ambiente húmedo mediante el goteo constante de solución Hartmann (cloruro de sodio, 600g; cloruro de potasio, 0.030g; cloruro de calcio dihidratado, 0.020g; lactato de sodio, 0.310g; agua inyectable, 100ml). Así mismo, la temperatura del animal se mantuvo constante mediante calor radiante, durante todo el experimento. Por ello es necesario que antes de efectuar cualquier tipo de registro de la actividad contráctil de un músculo, determinar la longitud óptima (L_o), esto es la longitud a la cual los elementos elásticos en paralelo que lo rodean (tejido conectivo) y

los elementos elásticos en serie que lo unen al hueso (tendones), están parcial o totalmente estirados (Hill, 1938, Huxley y Niedergerke, 1954), de manera que las sarcómeras de las fibras musculares puedan desarrollar su máxima tensión. Para establecer L_0 , el músculo en estudio se llevó, mediante un tensiómetro, a longitudes cercanas a L_r y en cada de ellas se le provocó una sacudida simple mediante un pulso de corriente con amplitud de 20 V y 0.5 ms de duración. La longitud óptima es aquella a la cual se obtuvo la máxima respuesta del músculo al estímulo antes descrito. Una vez establecida L_0 , se determinó el umbral de respuesta mecánica, esto la intensidad del estímulo que provocó la primera contracción muscular, visible a simple vista o mediante el transductor isométrico; posteriormente se incrementó el voltaje del pulso de estimulación, a intervalos de 5V, con el objeto de establecer la amplitud del estímulo (intensidad supra-máxima) que provocó la máxima tensión de la respuesta contráctil. Cabe señalar que para provocar la actividad contráctil del músculo en estudio se utilizó un par de electrodos de estimulación colocados sobre la superficie de éste, con los cuales se aplicaron pulsos eléctricos únicos (de intensidad supra-máxima y 0.5 ms de duración) o trenes de pulsos (de similar intensidad y duración) con frecuencias de 1, 5,10, 20, 30, 40, 50 y 100 Hz, durante tres segundos. Las respuestas contráctiles se registraron en papel y se almacenaron para su posterior análisis.

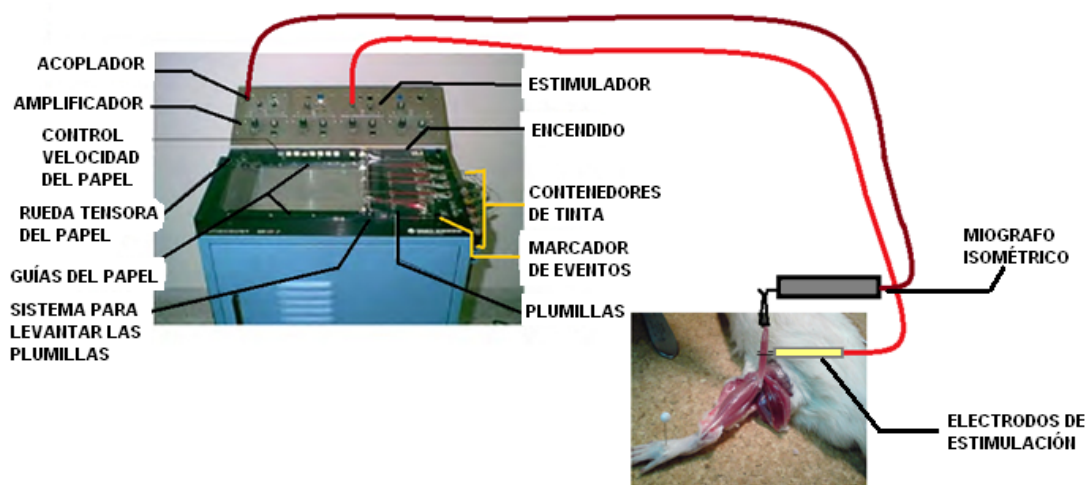


Figura 7. Sistema de registro utilizado para evaluar la actividad contráctil del músculo EDL de ratas macho, control y ejercitadas.

Al término del registro, el músculo fue separado de la extremidad del animal y pesado con el objeto de normalizar las tensiones, calculadas a partir de los registros, a un gramo de tejido muscular.

DIAMETRO DE LAS FIBRAS MUSCULARES

Algunos músculos (n=5) de los animales en estudio, fueron seleccionados al azar para efectuar la medición de las fibras que los constituyen; en este punto es conveniente señalar que estos músculos pertenecen a los lotes de animales (Control y Ejercitadas), utilizados para efectuar el estudio de la mecánica contráctil, pero no se sometieron al protocolo de estimulación descrito antes, para evitar los posibles daños morfológicos provocados por la aplicación de los pulsos de corriente utilizados para provocar la contracción.

Los músculos fueron extraídos y fijados con formol al 10% para su posterior tratamiento.

Los músculos de los animales control y ejercitados fueron preparados mediante la técnica histológica de rutina (Montalvo,2010) en el laboratorio de Biología del desarrollo de la FES-IZTACALA.

La cuantificación del área y el diámetro de las fibras musculares se efectuó en el laboratorio de microscopia de la FES-Iztacala, mediante un microscopio óptico conectado a una computadora de escritorio, que contaba con un programa que nos permitió medir el diámetro de las fibras musculares presentes en cada uno de los músculos en estudio. Para ello, el músculo el área total del músculo fue dividida en cuadrantes de 4.9 mm x 3.2 mm y se midieron las fibras contenidas en “n” cuadrantes, distribuidos en las regiones a, b. c del músculo EDL de animales control y ejercitados.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Los datos obtenidos fueron analizados mediante una prueba de t de Student ($\alpha= 0.05$, para dos colas), con el objeto de establecer si existen o no diferencias, causadas por el tratamiento aplicado, en los parámetros evaluados.

RESULTADOS.

Luego de efectuar el registro tanto de las características morfológicas como de las propiedades contráctiles del músculo EDL de los organismos control y sometidos a ejercicio durante tres semanas, se encontró lo siguiente:

A) CARÁCTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS:

a) PESO CORPORAL.

El peso corporal de los animales control y ejercitados, se cuantificó tanto al inicio del estudio como después de las tres semanas de entrenamiento mediante nado forzado, observándose que al inicio del experimento no hubo diferencias significativas en el peso corporal de ambos lotes (Fig. 8 A).

No obstante, al finalizar el período de entrenamiento se observó un ligero aumento en el peso corporal del lote experimental, respecto del control. Aunque este incremento carece de significancia estadística, nos permite suponer que el ejercicio constante puede aumentar la masa corporal de los animales sometidos a entrenamiento.

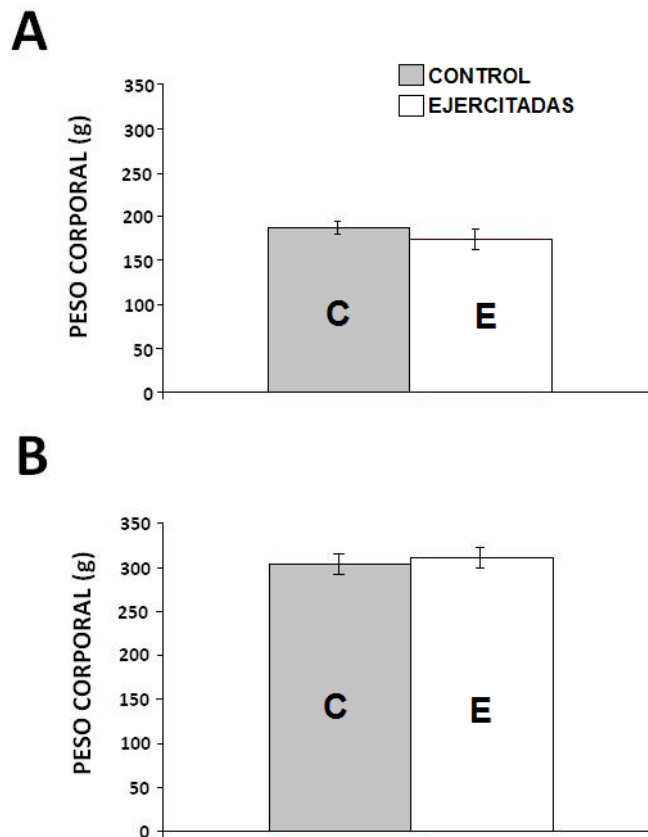


Figura 8. Pesos promedio A) inicial y B) final de los animales control y sometidos a nado forzado durante tres semanas consecutivas. Las barras verticales representan el error estándar (t de Studente, $p > 0.05$).

Lo anterior fue corroborado, al comparar la ganancia de peso de los animales control vs la ganancia de peso de los animales sometidos a ejercicio durante tres semanas (fig.9); en este caso tampoco se observaron diferencias estadísticamente significativas (t de Studente; $p>0.05$; $n=9$)

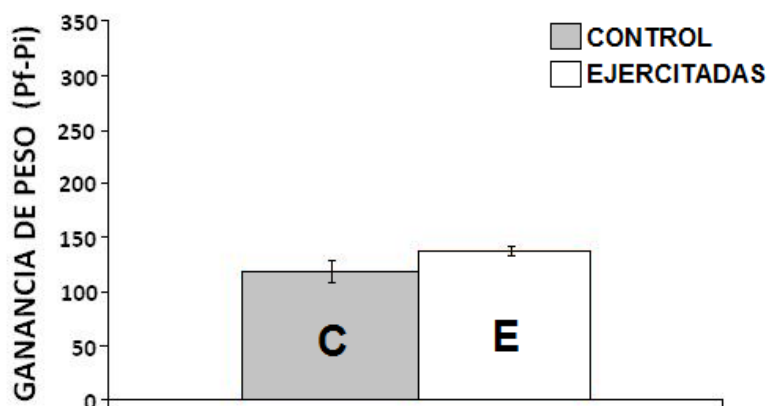


Figura 9. Ganancia promedio ($n=9$) para el peso corporal obtenida, para los lotes control y ejercitado durante tres semanas. **Las diferencias observadas carecen de significancia estadística** (t de Student; $p>0.05$). Las líneas verticales representan el error estándar.

b) PESO DEL MÚSCULO EDL.

Por otra parte, considerando que alrededor del 50% del peso corporal de un mamífero es proporcionado por la masa muscular, es de esperarse que el músculo en estudio, presente un incremento de peso proporcional al observado en el organismo completo. Por esta razón, al finalizar el protocolo de estimulación eléctrica al cual fue sometido el músculo EDL de animales controles y ejercitados, dicho músculo fue separado del cuerpo del animal y pesado con el objeto de conocer si el nado continuo incrementó la masa muscular.

En este caso, nuestros resultados muestran los músculos EDL, de animales control y ejercitados, no mostraron diferencias significativas, por lo que podemos decir que no existieron cambios en la masa de los músculos EDL de los animales controles en relación con los animales sometidos a ejercicio (Fig. 10).

En resumen, podemos afirmar que el ejercicio realizado durante tres semanas continuas, no modificó los pesos corporal ni muscular de los animales experimentales; pero es posible que al incrementar el tiempo de ejercicio a un

mayor número de semanas, se obtengan incrementos significativos en el peso corporal y el del músculo EDL.

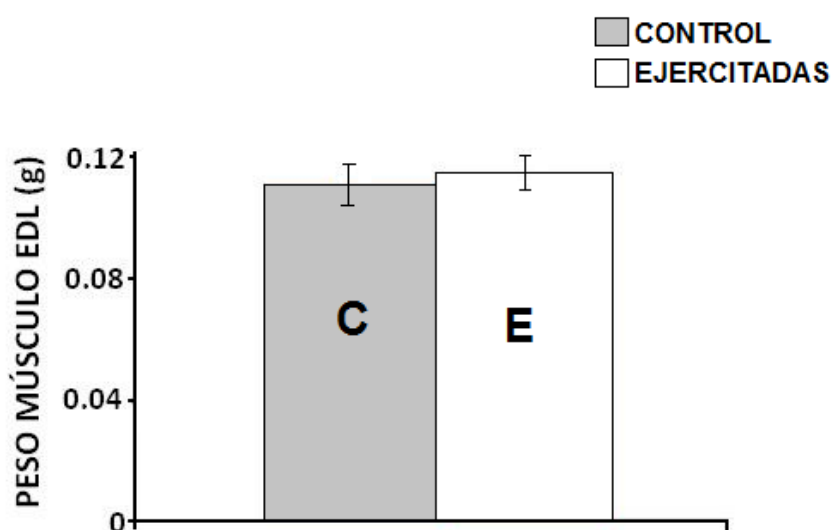


Figura 10. El peso del músculo EDL de animales ejercitados (nado forzado), durante tres semanas, no presentó diferencias significativas con el mismo músculo de animales control (t de Student, $p > 0.05$). Cada barra es el promedio de 9 músculos, las barras verticales señalan el error estándar.

B. PROPIEDADES CONTRÁCTILES:

También es posible suponer que el nado forzado, aunque no altere el peso del organismo o de su musculatura esquelética, si modifique las características contráctiles del músculo en estudio. De manera que el siguiente objetivo de nuestro estudio fue conocer el efecto del ejercicio aeróbico sobre algunas propiedades contráctiles del músculo EDL.

a) UMBRAL.

El umbral de generación de la respuesta mecánica es la cantidad mínima de energía (la intensidad del estímulo, cuantificada en corriente o voltaje), capaz de producir una contracción muscular (Hüter-Becker, 2006). Por tal razón, el primer registro eléctrico-mecánico que se le realizó al músculo EDL de los animales fue la obtención del umbral. Éste presentó una enorme variabilidad, tanto en los animales controles y ejercitados (Fig. 11); lo cual provocó la carencia de diferencias estadísticamente significativas entre ambos lotes, a pesar de la notable disminución observada gráficamente en el voltaje umbral de los animales ejercitados; por lo anterior puede relacionarse con una gran

variabilidad en el diámetro de las fibras que constituyen tanto a los músculos de las ratas controles, como en los de los animales sometidos a ejercicio. También pone en evidencia la importancia de utilizar voltajes de intensidad supramáxima durante el estudio de la respuesta muscular durante la estimulación con diferentes frecuencias.

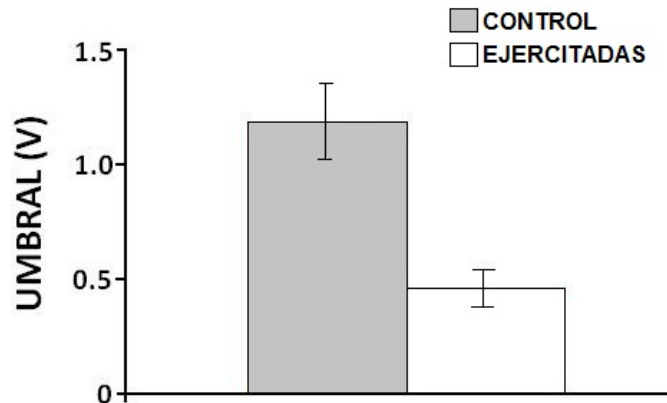


Figura 11. Voltaje umbral del músculo EDL en animales control y ejercitados (t de Student, $p > 0.05$; $n = 9$; las barras verticales representan el error estándar).

b) FUERZA O TENSIÓN

Después de haber obtenido el umbral del músculo EDL de cada ejemplar, se estimuló al músculo con intensidades crecientes de voltaje, hasta observar que la respuesta mecánica (sacudida simple), no incrementa su amplitud a pesar de que se aumente la intensidad del estímulo. Esta intensidad de estimulación se denomina voltaje supramáximo y su uso, durante la fase experimental, nos asegura que se están estimulando todas las fibras que constituyen al músculo en estudio.

Posteriormente, se continuó con un protocolo que consistió en estimular al músculo con intensidad supramáxima y frecuencias crecientes (1,5,10,20,30,40,50,100 Hz), con el objeto de cuantificar el incremento de tensión (fuerza) que desarrolla el músculo EDL en respuesta a la frecuencia de estimulación

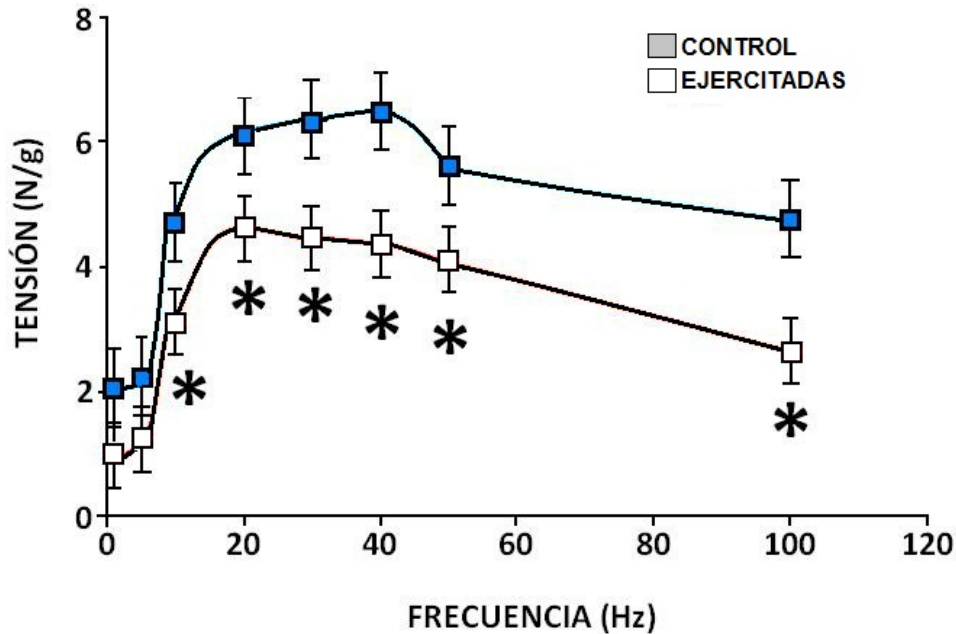


Figura 12. Tensión promedio (N/g de tejido), desarrollada por los grupos control (cuadro lleno) y ejercitado (cuadro vacío) en respuesta a la estimulación con frecuencias crecientes. Cada punto es el promedio de 9 músculos, las barras verticales representan el error estándar.

Nuestros resultados mostraron que el músculo EDL de los animales sometidos a ejercicio de resistencia (nado forzado) durante 3 semanas, redujeron considerablemente su fuerza en comparación con los animales control, mostrando diferencias estadísticamente significativas a partir de los 10 Hz de frecuencia (fig. 12). Este resultado nos indica que posiblemente el ejercicio realizado provocó que las fibras de contracción rápida (muy abundantes en el músculo EDL), se hayan transformado en fibras de contracción lenta o intermedia, como un proceso de adaptación al tipo de actividad realizada.

Una vez terminado el registro mecánico del músculo EDL; este fue separado del animal, pesado y preparado para el análisis histológico, que se efectuó con el objeto de establecer si los cambios registrados en el patrón de contracción están asociados con modificaciones en el tipo de fibra muscular presente en el músculo EDL de ratas controles y sometidas a ejercicio.

C. DIÁMETRO DE LAS FIBRAS

Como se mencionó en la introducción, las características morfológicas y las propiedades contráctiles de las fibras musculares se encuentran

estrechamente asociadas. Para interpretar adecuadamente los resultados obtenidos en esta sección, conviene recordar que las fibras de contracción lenta o intermedia son más delgadas y desarrollan menor tensión por gramo de tejido que las fibras de sacudida rápida.

Para efectuar el análisis histológico de las fibras musculares que constituyen al músculo EDL de animales control y sometidos a nado forzado, se realizaron cortes transversales de dicho músculo, ya que de esta manera fue posible cuantificar el área y el diámetro de las fibras musculares que contenían. Para cuantificar el diámetro de las fibras contenidas por estos músculos, la superficie total del músculo se dividió en cuadrantes de 4.9mm x 3.2mm.

Los resultados obtenidos después de medir cinco de estos cuadrantes por cada músculo, muestran que el diámetro de las fibras de músculos procedentes de ratas sometidas a ejercicio durante tres semanas, tuvieron un diámetro menor que las de los músculos de animales control (fig 13).

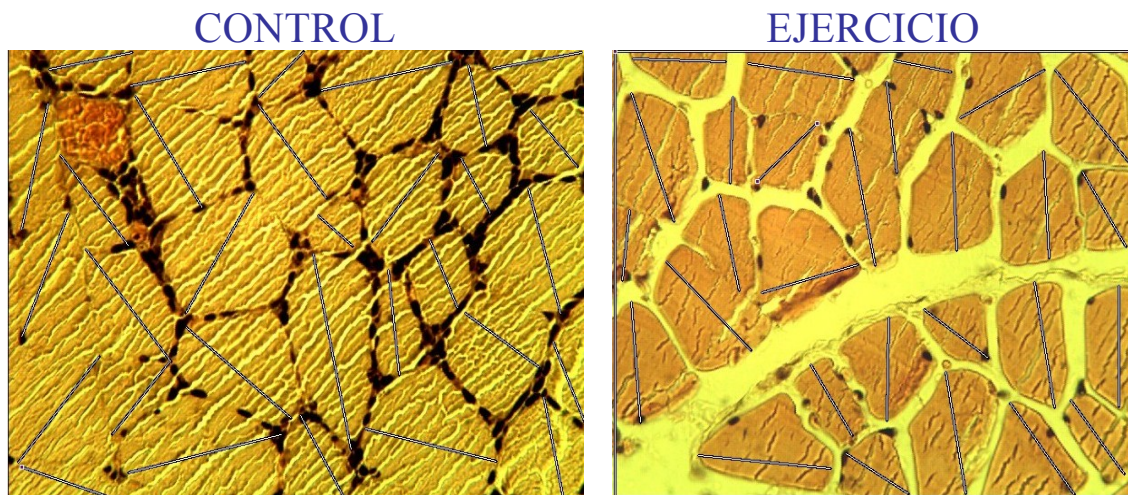


Figura 13. Microfotografías (40x) representativas de la cuantificación del diámetro de las fibras que constituyen el músculo EDL de ratas control y sometidas a ejercicio durante tres semanas. Nótese que el área promedio de las fibras de músculos control es mayor.

Este resultado se hace más evidente al graficar el diámetro promedio de las fibras musculares de animales control y ejercitados (fig 14). Por otra parte, al representar (mediante un polígono de frecuencias), la distribución de los diámetros cuantificados el músculo EDL de ratas control y ejercitadas (Fig 14B) observamos que se presentan con mayor frecuencia las fibras musculares con

diámetro menor en los músculos de animales sometidos a ejercicio, en comparación con los músculos del grupo control.

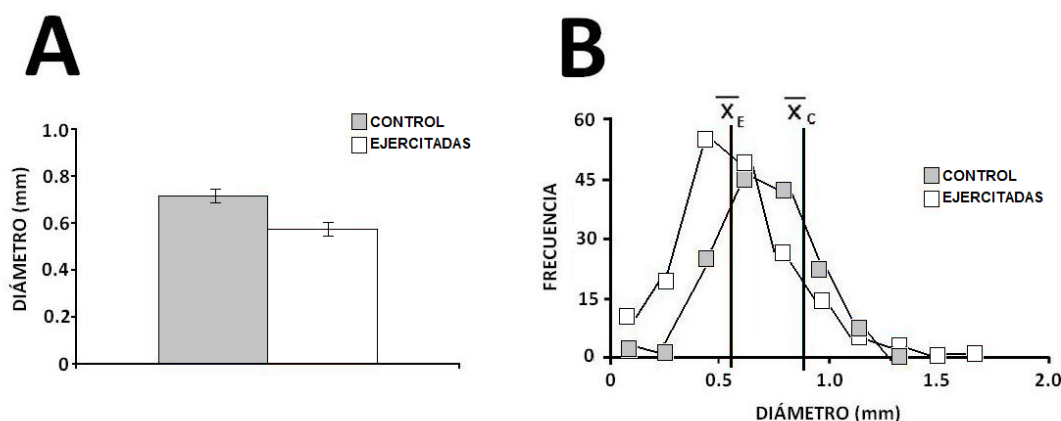


Figura 14. El diámetro promedio de las fibras localizadas en los músculos de animales sometidos a ejercicio fue menor que el de las fibras ubicadas en músculos de ratas control (A). En la gráfica B se observa que las fibras de los músculos de animales sometidos a nado forzado presentan una mayor frecuencia de fibras musculares con diámetro menor en comparación con los músculos del grupo control

Lo anterior nos sugiere que las fibras musculares de los animales sometidos a ejercicio durante tres semanas han modificado, tanto sus características estructurales como sus propiedades contráctiles, como respuesta adaptativa a la actividad prolongada (media hora de nado forzado por día)

DISCUSIÓN.

El músculo esquelético es un tejido dinámico, capaz de adaptarse a las demandas funcionales cambiantes, mediante la alteración de su perfil fenotípico, su masa, o ambas; esto se debe a la plasticidad de las fibras musculares, que siempre se adaptan a los cambios en el nivel de actividad (Astrand, 2010).

El ejercicio físico produce numerosas adaptaciones fisiológicas y morfológicas a nivel muscular; puede inducir cambios en la regulación y transcripción de genes específicos que modifica la cantidad de proteínas de una determinada isoforma en las fibras musculares. (Boffi, 2008).

Las adaptaciones que generará el músculo, dependerá de la naturaleza del ejercicio (aeróbico- anaeróbico), de la frecuencia, intensidad y duración del mismo.

El ejercicio desarrolla un efecto sobre el recambio metabólico de las proteínas musculares; pero el efecto varía dependiendo del tipo de fibra muscular. Las fibras rápidas, aumentan la síntesis de proteínas (hipertrofia), mientras que en las fibras lentas responden disminuyendo su índice de degradación proteínica (Goldspink, 1992).

Tomando en consideración lo anterior, podemos sugerir que la actividad física de resistencia (nado forzado) realizada durante 30 minutos diarios, en un periodo de tiempo de 3 semanas, por los animales experimentales, actuó como ejercicio de baja intensidad, en el cual la máquina contráctil no necesitó desarrollar tensiones extremas, por lo tanto estos animales no requirieron incrementar la síntesis de proteínas contráctiles (hipertrofia), por lo que no se encontraron diferencias significativas en el peso corporal, ni en el del músculo EDL de estos animales.

Este resultado también sugiere que la respuesta adaptativa del músculo esquelético al entrenamiento de larga duración y baja intensidad consiste en una disminución de la degradación proteínica, por lo que a pesar del desgaste muscular al cual fueron sometidos los animales ejercitados, estos no presentaron cambios significativos en su peso, en comparación con los animales control.

El siguiente paso de nuestra investigación fue el de analizar la mecánica muscular del EDL. La primera prueba que se le realizó al músculo fue la obtención del umbral. Nuestros resultados mostraron una disminución considerable del voltaje umbral en los animales experimentales (Figura 11); pero debido a factores externos (como la imposibilidad de mantener fijo el sistema de registro) estos resultados presentaron una enorme variabilidad, por lo cual preferimos tomarlos con reserva y plantear la necesidad de efectuar una nueva serie de registros, lo cual nos permitirá modificar o corroborar este resultado.

Por otra parte, los animales sometidos a nado forzado desarrollaron una menor tensión por gramo de tejido que los músculos de los animales control; es decir los animales ejercitados desarrollaron menor fuerza a las diferentes frecuencias de estimulación, en comparación con los animales control.

Pero ¿cómo podríamos explicar que la actividad física a la cual fueron sometidos estos animales provocara una disminución en la fuerza de contracción del músculo EDL?

Considerando que el músculo EDL presenta una composición de 42% fibras GR, 54% fibras OGR y 4% en fibras OL (Rankin, 1998), lo cual le confiere características contráctiles de músculo de sacudida rápida, fuerte y altamente fatigable. En condiciones normales este músculo puede desarrollar una tensión alta a diferentes frecuencias de estimulación, como fue el caso de los animales controles. No obstante en los músculos de animales ejercitados desarrollaron significativamente menos tensión

Para que exista un cambio significativo en las propiedades contráctiles de un músculo (como el que desarrollaron los animales ejercitados); es necesario que exista un cambio en el tipo de fibras que lo constituyen, ya que estas son las que le confieren las características contráctiles al músculo (rápido, lento, fatigable, resistente a la fatiga) (Tortora, 2009). Tomando esto en cuenta, nuestros datos nos permiten sugerir que el músculo EDL de los animales ejercitados, generó adaptaciones al ejercicio al cual fue sometido. Y al tratarse de una actividad de larga duración y baja intensidad, ocurrió una especialización de las fibras. Esto es, el EDL de los animales sometidos a ejercicio se transformó de un músculo con predominancia de fibras de sacudida rápida y altamente fatigables, a un músculo cuyas fibras predominantes son ahora de sacudida lenta, pero resistentes a la fatiga.

Para tratar de asociar este cambio en las propiedades contráctiles del músculo en estudio se realizaron pruebas histológicas que nos permitieron conocer el diámetro de las fibras musculares contenidas en el EDL de animales control y sometidos a nado forzado, para lo cual empleamos la tinción con hematoxilina, toda vez que ésta nos permite cuantificar la variable deseada.

Ahora bien, como ya se mencionó la medición del diámetro de las fibras presentes en el EDL de ambos grupos en estudio, nos permitió diferenciar los diferentes tipos de fibras musculares presentes. En este sentido, el diámetro promedio de las fibras musculares presentes en el EDL de los animales ejercitados fue menor en comparación al diámetro promedio de las fibras musculares de los animales control (figs. 13 y 14).

Otros estudios realizados en ratas, han mostrado que después de ser sometidas a un entrenamiento de 15 semanas en una banda sin fin, los músculos de estos animales presentaron un incremento en la proporción de fibras lentas e intermedia, así como una reducción en el contenido de fibras rápidas (Astrand, 2010). También se ha encontrado aumento significativo y precoz (en menos de 3 meses) en el diámetro de sección de las fibras de tipo I y IIA como consecuencia del entrenamiento. Esto está parcialmente explicado por la conversión de fibras musculares en dirección IIX \rightarrow IIA \rightarrow I, ya que las fibras IIX y IIA muestran un diámetro de sección mayor que las fibras de tipo I (Rivero et al, 1995). Estos trabajos, en los que se han utilizados tinciones específicas que permiten distinguir a las fibras de sacudida rápida, lenta e intermedia en función de la isoforma de miosina que éstas presentan, presentan resultados semejantes a los reportados en este trabajo y fortalecen nuestra hipótesis de que el ejercicio prolongado y de bajo impacto, favorece la transformación de las fibras musculares de sacudida rápida fatigables, en fibras de contracción lenta o intermedia.

Por otro lado Salmons y Henriksoson (1981), reportaron que la estimulación eléctrica continua de baja frecuencia (10 Hz) sobre un nervio, que inerve un músculo de fibras de contracción rápida, transforma gradualmente el músculo haciéndolo que adopte características típicas de las fibras de contracción lenta, aumentando también la densidad capilar y la actividad de las enzimas oxidativas y aunque la actividad impuesta al músculo mediante estimulación eléctrica sea muy sencilla comparada con la actividad que se produce durante el entrenamiento físico, los músculos se adaptan a estas dos estrategias experimentales de forma asombrosamente parecida (Salmons, 1994). Este reporte es de interés para nuestro estudio, porque durante la actividad física de bajo impacto, las motoneuronas (cuya función es iniciar y mantener la actividad muscular), envían al músculo potenciales de acción de baja frecuencia, como ocurre con nuestros animales sometidos a nado forzado.

Luego de considerar estos estudios y nuestros propios resultados, sobre el efecto que tiene el entrenamiento en las características morfológicas y funcionales de los músculos, es razonable pensar que los tipos de fibras musculares sufren cambios en orden secuencial desde fibras de contracción rápida glucolíticas a otras más lentas y oxidativas.

Por otra parte, la relación estímulo-respuesta entre la duración total del programa de entrenamiento y la magnitud de los cambios ocurridos han sido demostrados recientemente a nivel molecular (Rivero et al., 1995), considerando que inicialmente ocurre la transición de fibras de tipo OR → OGR durante la fase temprana de entrenamiento, y luego un nuevo umbral para la transición de fibras tipo OGR → OL. De esta forma, una fibra muscular es capaz de transformarse en forma completa desde fibra rápida a fibra lenta si posee un tiempo suficiente de entrenamiento (Boffi, 2008).

En resumen, nuestros resultados fortalecen la hipótesis de que la actividad física realizada por los animales experimentales, durante un periodo de 3 semanas, fue la causa de que las fibras musculares (predominantemente rápidas) que constituyen al músculo EDL en condiciones de escasa actividad física, adquirieran características similares a las de los músculos de contracción lenta o intermedia. Esto significa que los músculos de animales sometidos a ejercicio prolongado y de bajo impacto, adaptaron sus características morfológicas y en consecuencia sus propiedades funcionales, para que el organismo fuera capaz de tener un rendimiento óptimo en el tipo de actividad impuesta.

Este trabajo es el primero de una serie que pretende analizar las adaptaciones que ocurren en el músculo esquelético, cuando un organismo es sometido a diferentes tipos de ejercicio (de resistencia o de velocidad, aerobio o anaerobio) y permitirá responder algunas preguntas como: ¿cuál es el tiempo mínimo que se necesita para generar una adaptación de este tipo?; ¿cuál es el tiempo límite en el que el organismo ya no es capaz de generar más adaptaciones?; ¿los músculos de organismos entrenados son más resistentes a las fatiga?; etc

CONCLUSIONES.

1. Los animales sometidos a nado forzado durante 3, no incrementan significativamente su peso corporal.
2. Los músculos de contracción rápida (como el EDL), no sufren un incremento significativo en su peso, cuando el animal es sometido a nado forzado.
3. El umbral de respuesta mecánica no se modificó significativamente en el músculo EDL de los animales sometidos a nado forzado, pero este resultado fue afectado por la enorme variabilidad en este parámetro, observada en ambos lotes de ratas (controles y entrenadas).
4. El músculo EDL de las ratas sometidas a nado forzado, disminuyó significativamente su tensión, cuando fue estimulado con frecuencias crecientes.
5. El diámetro promedio de las fibras musculares contenidas en el músculo EDL de animales sometidos a nado forzado disminuyó significativamente, respecto del mismo parámetro cuantificado en los músculos de ratas control.
6. Se sugiere que tanto la disminución en el desarrollado, como el decremento en diámetro de las fibras del músculo EDL, reportados en los animales entrenados, se deben a que éstos sufrieron un proceso adaptativo, en el que ocurrió la transformación de fibras de contracción rápida fatigables a fibras de sacudida lenta o intermedias resistentes a la fatiga.
7. Las 3 semanas de nado forzado a las cuales fueron sometidos los animales entrenados fueron suficientes para generar adaptaciones al ejercicio a nivel muscular.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- Astrand, P. O. (2010). *Manual de fisiología del ejercicio*. España: Paidotribo.
- Barclay, C. (1996.). *Mechanical efficiency and fatigue of fast and slow muscle of the mouse*. J Physiol.
- Barbany, J. (2002). *Fisiología del ejercicio físico y entrenamiento*. Barcelona: Paidotribo.
- Boffi, F. (2008). *Entrenamiento y adaptación muscular. Sustratos y vías metabólicas para la producción de energía* (Vol. 37). Brasil: Revista Brasileira de Zootecnia.
- Cadefau, J., H.J. Green, R. Cusso, M. Ball-Burriett, and G. Jamieson.(1994) *Coupling of muscle phosphorylation potential to glycolysis during work after shortterm training*. J Appl. Physiol. 76: 2586-2593.
- Camiña FF, C. C. (2008). *La musculatura implicada en los diferentes estilos natatorios*. Paidotribo.
- Drucker,R. (2005), *Fisiología Medica*. México D.F. Manual Moderno
- Florotto, M. D. (200). *Regularion of myofibrillar proteina turnover during maturation in normal and undernourished rat pups*. J. Physiol (278), 845-854.
- Fox, E. (1992). *Fisiología del deporte*. Buenos Aires, Argentina: Medica Panamericana.
- Goldspink, G. (1992). *Cellular and molecular aspects of adaptation of muscle in response to different physiological demands*. Oxford: Blackwell Scince .
- Green, H.J., R. Helyar, M. Ball-burnett, N. Kowalchuk, S. Symon, and B. Farrance(1992). *Metabolic adaptations to training precede changes in muscle mitochondrial capacity*. J. Appl. Physiol. 72: 484-49 1.
- Hüter-Becker, A. S. (2006). *Fisilogía y teoría del entrenamiento*. Stuttgart, Alemania: Paidotribo.
- Huxley, A., Niedergeserke, R. (1954). *Structural changensin muscle during contraction: Interference microscopy of living muscle fibres*. Nature 173:971-972
- Huxley, H. (2007). *Evidence about the structural behavior of myosin cross bridges during muscle contraction*. Adv Exp Med Biol , 592, 315-326.
- Kernell, D. (2000). *The motoneurone and its muscle fibres*. Oxfor Univ. Press , 5-65.

- López, J. (2006). *Fisiología del ejercicio*. Madrid: Médica Panamericana.
- Montalvo, C. (2010). *Técnica histológica*. Facultad de Medicina, UNAM.
- Rankin, L. E. (1998). *Coexistence of twitch potentiation and tetanic force decline in rat hindlimb muscle*. *J,App. Physiol*, in press.
- Rivero, J. R. (1995). *Effects of a 3 months endurance training programme on skeletal muscle histochemistry in Andalusian, Arabian and Anglo-Arabian horses*. *Vet. Journal* , 27, 51-59.
- Rose, A. R. (2009.). *Regulatory mechanisms of skeletal muscle protein turnover during exercise*. *J App Physiol* , 106, 1702-1711.
- Rodríguez NR, V. L. (2007). *Dietary protein, endurance exercise and human skeletal muscle protein-turnover*. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* , 40-45.
- Salmons, S., Henriksson, J. (1981). *The adaptive response of skeletal muscle to increased use* (Vol. 4). *Muscle Nerve*.
- Salmons, S. (1994). *Exercise, stimulation and tpe trasformation of skeletal muscle to increased use*. *Jounar Sport Med* .
- Segura. B. En prensa
- Serrano, E. (2010). *Antioxidant defence and inflammatory response in professional road cyclist during a 4-day competition* (Vol. 28). España: *Journal Sports Science*.
- Terjung, R. (1998). *Adaptaciones musculares al entrenamiento aeróbico*. *Revista de Actualización en Ciencias del Deporte* Vol. 17..
- Tortora, G. D. (2009). *Principios de Anatomía y Fisiología*. España: Editorial Médica Panamericana.