

EL MÚSCULO Y SU ESTRUCTURA

The muscle and its structure

Autores

**Dania Pérez Urías¹, Orlando Lugo-Lugo²,
Pablo Hernández-Almaraz², Tania Zenteno-Savín^{2*}**

Resumen

Los músculos posibilitan los movimientos cotidianos, así como el funcionamiento apropiado de todos los órganos de los animales. La estructura, composición y función del tejido muscular han sido temas ampliamente estudiados, permitiendo una clasificación a partir de su morfología y funcionalidad. Podemos reconocer tres tipos de músculos, el músculo estriado esquelético voluntario, el músculo liso involuntario y el músculo cardíaco involuntario. El músculo esquelético se halla principalmente conectado al esqueleto, sobre el que actúa para provocar los movimientos; una relación estrecha con el sistema nervioso central hace que este tipo de músculos trabaje a voluntad; bajo el microscopio se aprecia conformado en haces de fibras musculares estriadas con un patrón transversal característico. El músculo visceral da forma al tubo digestivo, los vasos sanguíneos, el aparato genitourinario, las vías respiratorias y otros órganos que trabajan automáticamente; su relación



con el sistema nervioso autónomo y su sensibilidad a otras sustancias químicas, como ciertas hormonas, hacen que este músculo contribuya en la homeostasis del cuerpo; se construye a partir de fibras musculares simples sin un patrón de estrías particular. Finalmente, el músculo cardíaco es particular del corazón y tiene la característica de ser biogénico, es decir que para funcionar se activa a sí mismo; su estructura microscópica consta de fibras ramificadas que construyen una red compleja, pero con un latido armónico conjunto. Las células de los tres tipos musculares tienen los mismos organelos que cualquier otra célula, pero se distinguen porque su estructura subcelular e intercelular está adaptada para generar movimiento.

Los estudios en cultivo de tejidos musculares han tenido impacto científico y tecnológico; con el cultivo de las células precursoras de los tres tipos musculares (mioblastos) se han abordado tópicos diversos, desde las capacidades adaptativas del músculo hasta los efectos que ciertos contaminantes tienen sobre el metabolismo celular. Por ejemplo, en el Laboratorio de Estrés Oxidativo del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C., se han evaluado las defensas antioxidantes de los mamíferos terrestres y marinos, cuando sus mioblastos son expuestos a contaminantes como el cadmio (un potencial carcinógeno), en tales investigaciones trasciende la importancia que los antioxidantes tienen como moléculas defensivas contra los daños oxidativos, tema de interés para entender a las células que dan formación a los músculos que nos mueven y mantienen nuestra homeostasis.

Palabras clave: célula muscular, movimiento

Summary

Muscles enable everyday movements, as well as the proper functioning of all the organs of animals. The structure, composition and function of muscle tissue have been widely studied topics, allowing a classification based on its morphology and functionality. We can recognize three types of muscles, voluntary skeletal muscle, involuntary smooth muscle, and involuntary heart muscle. Skeletal muscle is primarily connected to the skeleton, on which it acts to cause movements; a close relationship with the central nervous system makes this type of muscles work at

¹ Estudiante del Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios No. 230. La Paz, Baja California Sur- México; actualmente, estudiante de medicina en UNISON

² Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Programa de Planeación Ambiental y Conservación, Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, C. P. 23096, La Paz Baja California Sur, México.

*Autor de Correspondencia: E-mail: tzenteno04@cibnor.mx.

will; Under the microscope, it is seen forming bundles of striated muscle fibers with a characteristic cross-sectional pattern. Visceral muscle shapes the digestive tract, blood vessels, genitourinary tract, airways, and other organs that work automatically; its relationship with the autonomic nervous system and its sensitivity to other chemical substances, such as certain hormones, make this muscle contribute to the homeostasis of the body; it is built from simple muscle fibers without a particular striae pattern. Finally, the cardiac muscle is particular to the heart and has the characteristic of being biogenic, that is, it activates itself in order to function; its microscopic structure consists of branched fibers that build a complex network, but with a joint harmonic beat. The cells of the three muscle types have the same organelles as any other cell, but they

are distinguished by the fact that their subcellular and intercellular structure are adapted to generate movement. Studies in muscle tissue culture have had scientific and technological impact; With the culture of the precursor cells of the three muscle types (myoblasts), various topics have been addressed, from the adaptive capacities of the muscle to the effects that certain pollutants have on cell metabolism. For example, in the Oxidative Stress Laboratory of the Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste SC, the antioxidant defenses of terrestrial and marine mammals have been evaluated, when their myoblasts are exposed to pollutants, such as cadmium (a potential carcinogen), in these investigations it transcends the importance that antioxidants have as defensive molecules against oxidative damage, a topic of interest to understand the cells that train the muscles that move us and maintain our homeostasis.

Keywords: muscle cell, movement

1. Clasificación y función de los músculos

Los músculos pueden clasificarse desde un punto de vista morfológico como estriado esquelético, liso visceral y estriado cardíaco. Pero desde el punto de vista funcional, estos mismos músculos pueden ser reconocidos como voluntarios o involuntarios, porque son controlados de manera consciente o inconsciente, respectivamente.

Además, al unir ambas clasificaciones, se puede reconocer que existen tres tipos de músculos; el músculo estriado esquelético voluntario, el músculo liso involuntario y el músculo cardíaco involuntario (Barbany, 2002; Varillas-Marín, 2006).

1.1. Músculo esquelético

El músculo esquelético o somático se halla principalmente



conectado directa o indirectamente con el esqueleto, sobre el que actúa para provocar los movimientos. Los más de 600 músculos esqueléticos del cuerpo humano utilizan el principio de palanca para lograr su misión.

Al punto de apoyo en el hueso, generalmente un sitio relativamente inmóvil de un hueso largo, se le llama origen, y al extremo al que se le transmite fuerza o movimiento se le denomina inserción; los músculos de los brazos y las piernas son un ejemplo de ello (Fig. 1). El músculo esquelético realiza su trabajo gracias a tres características funcionales, la excitabilidad, la contractilidad y la relajación. La excitabilidad es la cualidad que le permite ser estimulado por un impulso nervioso. El estímulo se transmite a lo largo de todas las fibras que componen al músculo y, en respuesta, éstas se acortan, es decir, se contraen. Posteriormente, las mismas fibras se relajan y recobran su tamaño y su forma alargada, manteniéndose listas para recibir un nuevo estímulo. Cuando el músculo se contrae, transmite tensión a los huesos mediante una o más articulaciones y es así como se produce el movimiento (Jarmey y Sharkey, 2017; Varillas-Marín, 2006).

Los músculos tienen formas variadas, mientras que algunos son planos y en forma de túnica, otros son cortos y densos, aunque también los hay largos y finos. Su longitud en reposo, sin contar los tendones que ayudan a la fijación al hueso, se relaciona con la distancia requerida para contraerse; algunos músculos pueden acortarse casi a la mitad de su longitud máxima (Palastanga et al., 2007).

Cuando se observan al microscopio, estos músculos se aprecian como haces de fibras intrincadas y con estrías cruzadas particulares. Estas estrías corresponden a diminutos filamentos de proteínas (actina y miosina) que se alinean transversalmente al eje longitudinal de las

fibras y forman un patrón característico (Fig. 2).

Además, las fibras musculares reciben terminaciones de una fibra nerviosa que procede del cerebro o de la médula espinal. En la unión entre las fibras muscular y nerviosa se forma una estructura conocida como la unión mioneural o placa motora terminal (Le Vay, 2008).

Este tipo de músculos está bajo el control consciente del sistema nervioso central y se contrae a voluntad en respuesta de una señal emitida por su neurona, razón por la que se conocen también como músculos voluntarios (Silverthorn, 2008). La unidad motora básica de la contracción de un músculo esquelético se conforma por un grupo de fibras musculares y una motoneurona somática que las controla. Los músculos tienen la capacidad de generar fuerza; por ejemplo, los músculos de la mandíbula son capaces de ejercer una fuerza superior

a 70 kg (Alfaro-Moctezuma et al., 2012). Cuando una fibra se estimula por el potencial de acción proveniente de su motoneurona y recibe un segundo estímulo antes de que se complete la relajación del primero, esta segunda contracción se suma a la primera y se genera una tensión muscular mayor. Si la frecuencia del estímulo es demasiado alta, la fibra muscular no puede relajarse y, por lo tanto, permanece en un estado contraído denominado tetanización (Gal-Iglesias et al., 2007).

Esta condición supone un aumento en la demanda de energía local. La tensión muscular desarrollada por una contracción tetánica excede el máximo de una contracción única. De modo que, si el estímulo tiene la intensidad suficiente como para excitar a todas las fibras musculares de un músculo, entonces éste puede alcanzar el máximo estado de contracción muscular llegando a la tetanización completa y la máxima potencialidad de fuerza. Esto es lo que nos permite mantenernos en pie, sostener objetos pesados o comer. Sin embargo, un músculo no puede permanecer en estado tetanizado indefinidamente debido a la fatiga muscular; este tipo de músculo requiere de cierto estado de reposo (Bazán, 2014; Gal-Iglesias et al., 2007). Desde el punto de vista médico, en ciertas condiciones patológicas, este fenómeno puede estar relacionado con la liberación de aminas sensibilizantes que estimulan a receptores específicos (conocidos como nociceptores) que se relacionan con la producción de dolor y, a veces, con dolores crónicos (Sánchez et al., 2006).

Aunque las células musculares tienen los mismos organelos que cualquier otra célula, son claramente distinguibles porque su estructura subcelular e intercelular está adaptada para generar movimiento; esta especialización se manifiesta en una forma y arreglos particulares, por lo que las estructuras celulares del músculo

suelen tener nombres característicos (Barnett, 2015). La célula del músculo esquelético, fibra muscular o miocito esquelético llega a tener cientos de núcleos dispersos en su citoplasma (sarcoplasma), así como incontables mitocondrias (sarcosomas). Posee una membrana citoplasmática (sarcolema) cuya composición, arreglo dentro del mismo sarcoplasma y relación con el retículo endoplásmico (retículo sarcoplásmico) contribuyen en el proceso de la contracción de la fibra muscular. Este tipo de célula es cilíndrico, alargado, con anchura y longitud diversas; pueden medir hasta varios centímetros de longitud desde su origen hasta su inserción. Cada fibra es envuelta por una capa de tejido conjuntivo con vasos sanguíneos y nervios, llamada endomisio. El endomisio separa a cada fibra muscular de las fibras vecinas, aunque al mismo tiempo las mantiene



unidas; varias células agrupadas conforman un paquete denominado haz muscular. Este haz también está envuelto por una capa llamada perimisio. A su vez, varios haces musculares se unen para constituir el músculo propiamente. Finalmente, cada músculo se encuentra envuelto por otra capa llamada epimisio. Las tres capas de tejido conjuntivo, endomisio, perimisio y epimisio, se unen en los extremos del músculo para formar los tendones que se anclan al hueso (Le Vay, 2008; Palastanga et al., 2007; Varillas-Marín, 2006).

1.2. Músculo visceral

El músculo visceral es el tejido muscular con el aspecto más simple de los tres tipos musculares. Se considera el más primitivo y contribuye a mantener la homeostasis del cuerpo.

Este es el músculo que conforma el tubo digestivo, los vasos sanguíneos, el aparato genitourinario, las vías respiratorias y otros órganos huecos y tubulares que trabajan de manera automática, características por las que suele llamarse también músculo involuntario (Fig. 1). También posee las capacidades de excitabilidad, conductibilidad, contractilidad y tensión-relajación (Méndez-García, 2015). La función principal del músculo visceral es contribuir al movimiento de fluidos o materiales hacia el interior y exterior del cuerpo, pero también distribuirlos dentro del mismo cuerpo (Silverthorn, 2008).

Aunque cualquier músculo visceral puede ser estimulado para contraerse tan solo con el estiramiento, el control para realizar sus funciones es variado. Por ejemplo, hay músculos viscerales controlados por el sistema nervioso autónomo y son influenciados por neurotransmisores liberados en terminaciones nerviosas. El músculo visceral carece de regiones receptoras especializadas como las

placas motoras terminales del músculo esquelético; en cambio, el neurotransmisor simplemente difunde a través de la superficie celular hasta que encuentra un receptor.

Un ejemplo de ello son los movimientos musculares de la vejiga, los cuales poseen un ritmo propio originado por estímulos nerviosos. Los músculos que forman los sistemas digestivo, circulatorio, renal, y el aparato reproductor responden a diversas sustancias químicas; entre ellas, la adrenalina, la noradrenalina, o la serotonina (Gal-Iglesias et al., 2007; Le Vay, 2008; Silverthorn, 2008).

El músculo visceral, en general, se observa como haces o láminas de fibras alargadas cuando se le ve bajo el microscopio (Ross y Pawlina, 2007). Cada fibra corresponde a una célula que, típicamente, mide entre 20 μm en las paredes de los vasos sanguíneos

de pequeño calibre y 200 μm en la pared intestinal, pero pueden alcanzar hasta 500 μm en la pared del útero durante la gestación. El músculo visceral tiene forma de huso y posee un núcleo oval en su centro (Silverthorn, 2008). En este tipo de músculo se observan diminutos filamentos proteicos que se organizan a lo largo del eje longitudinal de la célula, pero no poseen un patrón regular, por lo que no se ven estrías transversas como sucede en el músculo estriado. Por tal característica, el músculo visceral también es referido comúnmente como músculo liso (Fig. 2). Las células musculares lisas están interconectadas por uniones de hendidura (nexos), lo que les permite tener comunicación entre ellas (Le Vay, 2008; Méndez-García, 2015; Silverthorn, 2008).

Además de las diferencias morfológicas, el músculo visceral es fisiológicamente distinto al esquelético en

el modo en que desarrolla la tensión. No existen límites a la amplitud de acortamiento y su ciclo de contracción-relajación es mucho más lento que el del músculo esquelético. Sin embargo, puede mantener la tensión durante períodos de tiempo largos sin llegar a la fatiga muscular; así, la tensión a una determinada longitud va disminuyendo poco a poco si el músculo se mantiene distendido, logrando sostener la tensión durante un largo periodo de tiempo. Esta característica explica la capacidad que algunos órganos tienen para aguantar la tensión, aún con una carga sostenida, como en el caso de la vejiga urinaria (Gal-Iglesias et al., 2007; Méndez-García, 2015).

Las características moleculares que propician la contracción de los músculos estriados, en general, se mantienen para el músculo liso. Por ejemplo, en ambos tipos de músculo el proceso de contracción está regulado por la concentración intracelular de calcio (Ca^{2+}), también por el deslizamiento de filamentos de proteína finos (actina) y gruesos (miosina), y por la vía de hidrólisis del ATP para la obtención de energía (Gal-Iglesias et al., 2007).

1.3. Músculo cardíaco

El corazón está compuesto por músculo, el músculo cardíaco o miocardio, y se conecta al sistema circulatorio por medio de vasos sanguíneos que entran y salen de él (Villalón y López-Farré, 2007). A través de sus cámaras auriculares y ventriculares, se recibe y distribuye la sangre al resto del cuerpo (Fig. 1). La función de bombear sangre para proveer a todos los tejidos y órganos se cumple gracias a que el músculo cardíaco posee características funcionales como la excitabilidad, conductibilidad, contractilidad y automatismo (Méndez-García, 2015; Villalón y López-Farré, 2007).



La función de bombeo depende de la contracción coordinada del corazón. El músculo cardíaco tiene la particularidad de ser biogénico. Esto quiere decir que para excitarse se activa a sí mismo, a diferencia del músculo esquelético que necesita de un estímulo consciente o reflejo, o del músculo visceral que requiere de hormonas y otras señales físicas y químicas. La característica biogénica del corazón hace que las contracciones rítmicas se produzcan espontáneamente, pero no impiden que la frecuencia de contracción sea modificada por influencias nerviosas o por sustancias liberadas por otras células, por ejemplo, iones u hormonas. La frecuencia cardíaca puede estimularse por el ejercicio físico o por emociones como el miedo, alegría o sorpresa (Barnett, 2015; Silverthorn, 2008; Villalón y López-Farré, 2007).

El músculo cardíaco se conforma por células individuales vinculadas por uniones complejas para formar una unidad funcional, la fibra muscular cardíaca (Kühnel, 2005; Silverthorn, 2008). La contracción espontánea intrínseca del músculo cardíaco, conocida comúnmente como latido, se ve tanto en las primeras células cardíacas embrionarias como en células musculares cardíacas que fueron aisladas de donantes adultos y posteriormente mantenidas en cultivo de tejidos en el laboratorio.

Característicamente, las células musculares cardíacas (cardiomiocitos) laten por sí mismas. Casi siempre tienen un solo núcleo central, pero no es raro encontrar células multinucleadas; pueden poseer menos de doce pares de núcleos

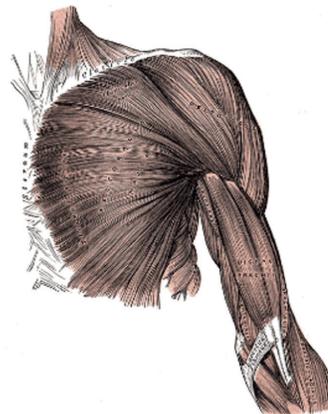
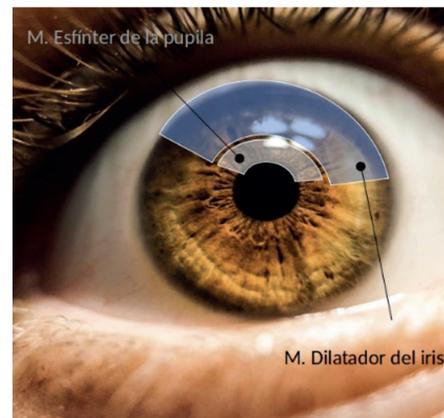
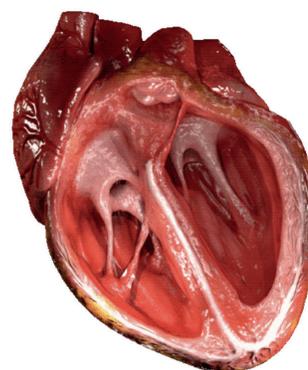
A**B****C**

Figura 1. Ejemplos de tipo de músculo: A. Los músculos de los brazos y el pecho son estriados, esqueléticos y voluntarios. B. Los músculos dilatador del iris y esfínter de la pupila son lisos e involuntarios. C. El corazón se conforma por músculo cardíaco involuntario. Imágenes A y C: Wikimedia, dominio público; B: A partir de fotografía de Kalea Jerielle en Unsplash, dominio público.

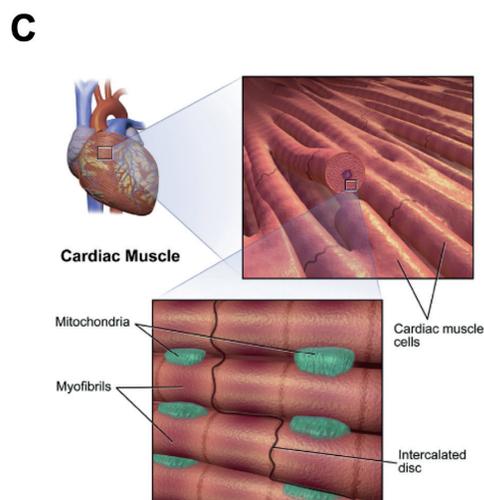
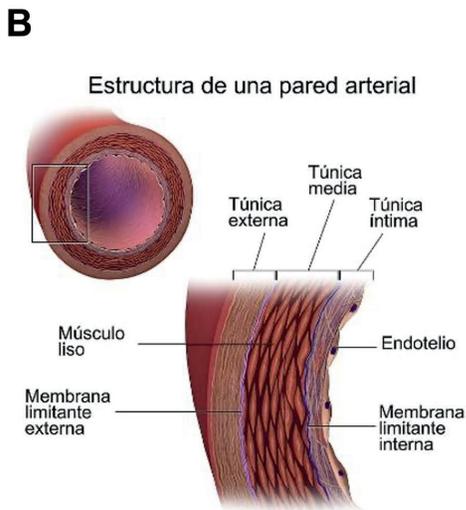
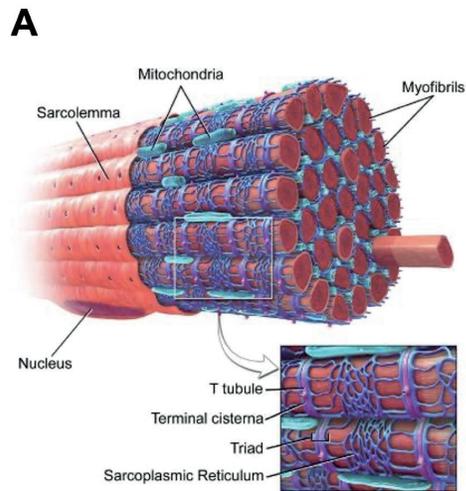


Figura 2. Estructura de los músculos. A. Músculo esquelético. B. Músculo liso. C. Músculo cardíaco. Imágenes: Wikimedia, dominio público.

distribuidos hacia el centro de la célula. Exhiben estriaciones vistas como bandas claras y oscuras alternantes, por lo que también se describe como músculo estriado (Kühnel, 2005; Silverthorn, 2008). A diferencia de las células musculares esqueléticas, las fibras musculares cardíacas se ramifican y se unen entre sí (anastomosan) a través de estructuras llamadas discos intercalares (bandas cruzadas que atraviesan transversalmente las fibras musculares), para formar una red sin una clara demarcación entre células, pero con un latido armónico conjunto (Fig. 2). En comparación con las fibras esqueléticas, las fibras musculares cardíacas son más finas; sin embargo, son más gruesas que las fibras musculares lisas (Kühnel, 2005; Le Vay, 2008; Ross y Pawlina, 2007; Silverthorn, 2008).

El latido cardíaco es iniciado, regulado y coordinado por un conjunto de células especializadas para la conducción de impulsos eléctricos. Tales células se organizan en nódulos y fibras (fibras de Purkinje) que generan y transmiten el impulso contráctil a las diversas partes del miocardio en una secuencia precisa y rápida, hasta cuatro veces más veloz que las células cardíacas comunes. El sistema nervioso es muy importante en este proceso. En los nódulos terminan fibras nerviosas simpáticas y parasimpáticas que trabajan conjuntamente para lograr una frecuencia adecuada. Mientras que los estímulos del sistema nervioso simpático aceleran los latidos cardíacos -porque aumenta la frecuencia de los impulsos a las células



de conducción-, los estímulos del sistema nervioso parasimpático ralentizan los latidos -porque disminuye la frecuencia de los impulsos- (Ross y Pawlina, 2007).

La contracción del músculo cardíaco y su regulación mediante iones y proteínas es similar a la del músculo esquelético y visceral. Sin embargo, la liberación de Ca^{2+} no se produce desde el retículo sarcoplásmico, sino en la membrana celular, donde son liberados a través de canales de Ca^{2+} dependientes de voltaje. Además, la larga duración del potencial de acción cardíaco es responsable de prevenir las contracciones sostenidas en el tiempo; esto es, la tetanización no existe en el músculo cardíaco. Esta característica es vital para el corazón, ya que es necesario que ocurra una relajación entre contracciones para permitir el adecuado llenado de los ventrículos y aurículas (Gal-Iglesias et al., 2007). La comprensión de la estructura y función de estas células proporciona información sobre las adaptaciones del corazón, así como sus cambios en condiciones normales o fisiopatológicas (Barnett, 2015).

2. Células musculares en cultivo

A través del estudio del músculo se han hecho innumerables descubrimientos que ahora son fundamentales para la comprensión de la biología de los seres vivos. Por ejemplo, parte del conocimiento que hoy tenemos sobre el metabolismo de moléculas y obtención de energía (metabolismo celular intermediario), fue delineado durante el estudio bioquímico de los miocitos.

Además, la física de la contracción muscular condujo al descubrimiento de los primeros motores moleculares (la miosina y la actina). Estos y otros descubrimientos fueron realizados en experimentos llevados a cabo *in vivo* e *in vitro*. Particularmente, algunos de los experimentos *in vitro* fueron posibles por la capacidad de los miocitos de ser aislados

y mantenidos con técnicas de cultivo celular (Blau y Webster, 1981; Emerson y Sweeney, 1997).

Se requirieron siglos de conocimiento científico para desarrollar las bases que permiten el desarrollo de cultivos celulares de cualquier tipo; desde el invento del microscopio en el siglo XVI, el desarrollo de la fisiología celular en los siglos XVIII y XIX, hasta los primeros precursores de cultivo de células a principio del siglo XX. En la primera etapa, se estudiaron las posibilidades y efectos del aislamiento de diversos tipos celulares, así como el funcionamiento de las células al ser aisladas de los seres vivos, y cómo mantenerlas el mayor tiempo posible bajo condiciones de laboratorio. Con el uso de medios nutritivos y la introducción de las novedades técnicas y científicas de la época (tales como la asepsia, la cautela de conservar la humedad y la temperatura, entre otras),

la técnica fue madurando hasta llegar a la etapa de ingeniería de cultivos del siglo XXI (Gil-Loyzaga, 2011).

Particularmente, las experiencias en el cultivo de células del tejido muscular mostraron que las fibras musculares son altamente organizadas y no se dividen cuando son cultivadas en su estado maduro. Sin embargo, el músculo esquelético es capaz de regenerarse a partir de células mononucleadas e indiferenciadas, denominadas generalmente como mioblastos (Fig. 3). Los mioblastos se mantienen poco activos en el tejido adulto y en un momento determinado, frente a un estímulo adecuado, se dividen y fusionan con otros mioblastos para formar los miocitos, que a su vez son los precursores los miotubos que maduran finalmente en fibras musculares. La proporción de mioblastos en el tejido muscular esquelético varía a lo largo del desarrollo y esto debe

tomarse en cuenta para iniciar un cultivo de este tipo de tejido muscular.



Figura 3. Miocitos en cultivo de tejidos donde se pueden observar miocitos y sus estructuras celulares. A. Haz de músculo esquelético humano. Se observan las fibras musculares y un vaso sanguíneo, así como algunas células adiposas. B. El inicio de un cultivo de células, donde se observa la propagación celular a partir de un fragmento de tejido. C. Un mioblasto típico de humano. Se observa la forma celular característica en cultivo, sus prolongaciones celulares, así como el citoplasma, núcleo y nucleolo. Imágenes tomadas en vivo, sin tinción y con iluminación de contraste de fases. Laboratorio de Estrés Oxidativo, CIBNOR, 2020.

Para cultivar mioblastos de músculo esquelético básicamente se deben seguir los siguientes pasos. Tomar una pequeña biopsia mediante una técnica quirúrgica rigurosa que evite la ruptura excesiva de fibras musculares.



Eliminar todo lo que se pueda del epimisio y las inserciones tendinosas.

Separar las células mediante disociación enzimática (utilizando tripsina y/o colagenasa). Ello resulta en una suspensión con fibras musculares, mioblastos y restos celulares. Para seleccionar solamente a los mioblastos, la suspensión suele filtrarse a través de una luz de malla relativamente grande (100 μm), seguida de una pequeña (20 μm), y finalmente lavarse con el mismo medio de cultivo que será usado para el mantenimiento. Para finalizar la siembra del cultivo celular, se debe contar idealmente con una concentración celular de 5×10^4 a 10^5 células mL^{-1} y tener contenedores apropiados (algunos tienen recubrimiento con colágeno o gelatina para favorecer la adhesión de las células al fondo de la placa).

Los cultivos de células musculares de mamíferos se pueden mantener en condiciones de incubación estándar, es decir, 37°C , 5% CO_2 en aire y humedad a saturación en la incubadora (Berendse et al., 2003; Gil-Loyzaga, 2011).

3. Células musculares para la investigación

Los mioblastos en cultivo han sido útiles en múltiples y diversas investigaciones. Por ejemplo, los mioblastos han sido modelos experimentales para estudiar la adaptación que sufre el músculo esquelético cuando éste se expone a condiciones de microgravedad para simular el caso de los astronautas que pasan largos períodos en el espacio (Slents et al., 2001). También se usan cultivos de células musculares para estudiar su capacidad miogénica en condiciones naturales o extremas, el desarrollo de patologías específicas, así como los efectos que ciertas sustancias estimulantes tienen sobre ellos (Gil-Loyzaga, 2011).

En el Laboratorio de Estrés Oxidativo del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C., se han hecho estudios para evaluar las defensas antioxidantes en células musculares de mamíferos terrestres y mamíferos marinos cuando son expuestas a retos específicos, por ejemplo, a contaminantes (Fig. 3). Las defensas antioxidantes son parte de una respuesta de defensa natural en las células. Cuando algunos patógenos y contaminantes ingresan a la célula, aumenta la producción de moléculas conocidas como especies reactivas de oxígeno (ERO) para defenderse de esas entidades ajenas. El aumento en la producción de ERO desencadena reacciones que incrementan la concentración de moléculas antioxidantes. Sin embargo, si la concentración de antioxidantes no aumenta en la proporción apropiada para balancear la producción

de ERO y contrarrestar sus efectos, se inicia una cadena de reacciones oxidativas que daña a moléculas estructurales y funcionales, tales como lípidos, proteínas y el propio ADN. Al desbalance entre las ERO y los antioxidantes, que conduce a daño celular, se conoce como estrés oxidativo y ha sido asociado con el inicio y desarrollo de varias enfermedades en seres vivos (Sies, 1997, 1991). Al comparar las defensas antioxidantes en células musculares de humano y de elefante marino del norte ante la exposición a cadmio (Cd), un elemento químico considerado potencialmente carcinógeno, se observaron diferencias en la actividad de las enzimas antioxidantes entre estas especies de tal manera que las células musculares de humano parecen ser más sensibles a este elemento (Del Águila-Vargas et al., 2020). La mayor tolerancia registrada en las células de elefante marino puede explicarse por la presencia de mayores niveles de antioxidantes, los cuales se relacionan a las adaptaciones evolutivas de esta especie para la vida marina, siendo probablemente las mismas características que le permiten soportar períodos prolongados de hipoxia durante el buceo sin presentar daño oxidativo (Allen y Vázquez-Medina, 2019; Zenteno-Savín et al., 2002).

4. Conclusiones y perspectivas

El conocimiento de la morfología y las bases del funcionamiento de los diferentes tipos de músculo permite entender la contribución de éstos a la locomoción, alimentación y distribución de nutrientes en el cuerpo, entre otras funciones vitales. El uso de técnicas como el cultivo de células y tejidos es de gran ayuda en las ciencias experimentales y ciencias de la salud, sus aplicaciones siguen prometiéndole avances biológicos y biomédicos.

Los estudios comparativos en cultivo celular y entre especies permiten plantear diversas interrogantes. Por ejemplo, pueden abordarse estudios de adaptaciones a diversos ambientes, cambios en la estructura y función de los músculos durante el desarrollo de un individuo, o cómo responden los músculos a la presencia de fármacos, contaminantes o patógenos. Este tipo de conocimiento apoya la labor de organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud y la Organización de las Naciones Unidas que buscan fomentar un medio ambiente más saludable y solucionar las amenazas ambientales que atentan contra la salud de los seres vivos.

5. Agradecimientos

A DG. Gerardo Hernández García por el apoyo editorial gráfico para este artículo



5. Referencias

- Alfaro-Moctezuma, P.E., Ángeles Medina, F., Osorno Escareño, M.D.C., Nuñez Martínez, J.M., Romero Esquiliano, G., 2012. Fuerza de mordida: su importancia en la masticación, su medición y sus condicionantes clínicos. *Rev. ADM* 69, 53–57.
- Allen, K.N., Vázquez-Medina, J.P., 2019. Natural Tolerance to Ischemia and Hypoxemia in Diving Mammals: A Review. *Front. Physiol.* 10. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01199>
- Barbany, J.R., 2002. *Fisiología del ejercicio físico y del entrenamiento*. Paidotribo, Barcelona.
- Barnett, V.A., 2015. Cellular Myocytes, en: *Handbook of Cardiac Anatomy, Physiology, and Devices*. Springer International Publishing, Cham, pp. 201–214. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19464-6_12
- Bazán, N.E., 2014. *Bases fisiológicas del ejercicio*. Paidotribo, Barcelona.
- Berendse, M., Grounds, M.D., Lloyd, C.M., 2003. Myoblast structure affects subsequent skeletal myotube morphology and sarcomere assembly. *Exp. Cell Res.* 291, 435–450. <https://doi.org/10.1016/j.yexcr.2003.07.004>
- Blau, H.M., Webster, C., 1981. Isolation and characterization of human muscle cells. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 78, 5623–5627. <https://doi.org/10.1073/pnas.78.9.5623>
- Del Águila-Vargas, A.C., Vázquez-Medina, J.P., Crocker, D.E., Méndez-Rodríguez, L.C., Gaxiola-Robles, R., de Anda-Montañez, J.A., Ramírez-Jirano, L.J., Lugo-Lugo, O., Zenteno-Savín, T., 2020. Antioxidant response to cadmium exposure in primary skeletal muscle cells isolated from humans and elephant seals. *Comp. Biochem. Physiol. Part C Toxicol. Pharmacol.* 227, 108641. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2019.108641>
- Emerson, C., Sweeney, H.L., 1997. No Title. Academic Press, London.
- Gal-Iglesias, B., López Gallardo, M., I., M.V.A., Prieto Montalvo, J., 2007. *Bases de la fisiología*. Editorial Tébar, Madrid.
- Gil-Loyzaga, P., 2011. *Cultivo de células animales y humanas: Aplicaciones en medicina regenerativa*. Vision Libros, Madrid.
- Jarmey, C., Sharkey, J., 2017. *Atlas conciso de los músculos*. Editorial Paidotribo, Barcelona.
- Kühnel, W., 2005. *Atlas color de citología e histología*. Editorial Médica Panamericana, Madrid.
- Le Vay, D., 2008. *Anatomía y fisiología humana*. Editorial Paidotribo, Barcelona.
- Méndez-García, E., 2015. *Manual de prácticas de Fisiología Veterinaria*. Tuxpan, Veracruz,

México.

- Palastanga, N., Field, D., Soames, R., 2007. Anatomía y movimiento humano. Estructura y funcionamiento. Editorial Paidotribo, Barcelona.
- Ross, M.H., Pawlina, W., 2007. Histología. Texto y Atlas color con Biología Celular y Molecular. Editorial Médica Panamericana, Madrid.
- Sánchez, I., Ferrero, A., Aguilar, J.J., Climent, J.M., Conejero, J.A., Flórez, M.T., Peña, A., Zambudio, R., 2006. Manual SERMEF de rehabilitación y medicina física. Sociedad Española de Rehabilitación y Medicina Física. Editorial Médica Panamericana, Madrid.
- Sies, H., 1997. Oxidative stress: oxidants and antioxidants. *Exp. Physiol.* 82, 291–295. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.1997.sp004024>
- Sies, H., 1991. Oxidative stress: From basic research to clinical application. *Am. J. Med.* 91, S31–S38.
- Silverthorn, D.U., 2008. Fisiología humana/Human Physiology: Un enfoque integrado. Incluye Sitio Web/An integrated approach. Editorial Médica Panamericana, Madrid.
- Slents, D.H., Truskey, G.A., Kraus, W.E., 2001. Effects of chronic exposure to simulated microgravity on skeletal muscle cell proliferation and differentiation. *Vitr. Cell. Dev. Biol. - Anim.* 37, 148. [https://doi.org/10.1290/1071-2690\(2001\)037<0148:EOCETS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1290/1071-2690(2001)037<0148:EOCETS>2.0.CO;2)
- Varillas-Marín, A.C., 2006. Los músculos y su adaptación al trabajo. *Lect. Educ. física y Deport.* ISSN-e 1514-3465 94.
- Villalón, J.M., López-Farré, A.L., 2007. El corazón del deportista, en: López-Farré, A., Macaya Miguel, C. (Eds.), *La salud cardiovascular del Hospital Clínico San Carlos y La Fundación BBVA*. Editorial Fundación BBVA, Madrid, pp. 597–604.
- Zenteno-Savín, T., Clayton-Hernández, E., Elsner, R., 2002. Diving seals: Are they a model for coping with oxidative stress? *Comp. Biochem. Physiol. - C Toxicol. Pharmacol.* 133. [https://doi.org/10.1016/S1532-0456\(02\)00075-3](https://doi.org/10.1016/S1532-0456(02)00075-3)

CITA DE ARTÍCULO:

Pérez Urías D., O. Lugo-Lugo, P. Hernández-Almaraz y T. Zenteno-Savín. 2021. El músculo y su estructura. Recursos Naturales y Sociedad, 2021. Vol. 7 (1): 1-15. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2021.07.07.01.0001>

Sometido: 10 de noviembre de 2020

Revisado: 12 de diciembre de 2020

Aceptado: 15 de febrero de 2021

Editor asociado: Dr. Ramón Gaxiola-Robles

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández