

2.1 ¿Qué es la recuperación?

2.1.1 ¿Qué es la recuperación?

Recuperación es una palabra que se usa muy a menudo en los deportes. Todo el mundo está convencido de que la "recuperación" es importante, y la mayoría de los equipos tienen implementadas "estrategias de recuperación". Sin embargo, es probable que si les piden a 10 personas una definición de recuperación obtengan 10 respuestas diferentes. Por lo tanto, es importante definir la recuperación para evitar cualquier malentendido. Además, todo el mundo parece tener una opinión sobre los alimentos que son buenos para la recuperación. La proteína es el primer nutriente en el que muchas personas pensarán, pero ¿es esta la parte más esencial de la recuperación?

Recuperación es un término amplio que se refiere a la restauración de la capacidad de rendimiento. Después de una sesión de entrenamiento intensa, el jugador está fatigado y la capacidad de rendimiento disminuye. En las horas y los días posteriores al ejercicio, el jugador se "recuperará" y la capacidad de rendimiento volverá a la normalidad (e incluso puede mejorar). El curso temporal depende de muchos factores, incluida la intensidad del ejercicio (la intensidad y la duración, así como algunos factores ambientales como la altitud y el calor), pero también depende de los métodos de recuperación utilizados, incluidos los nutrientes ingeridos.

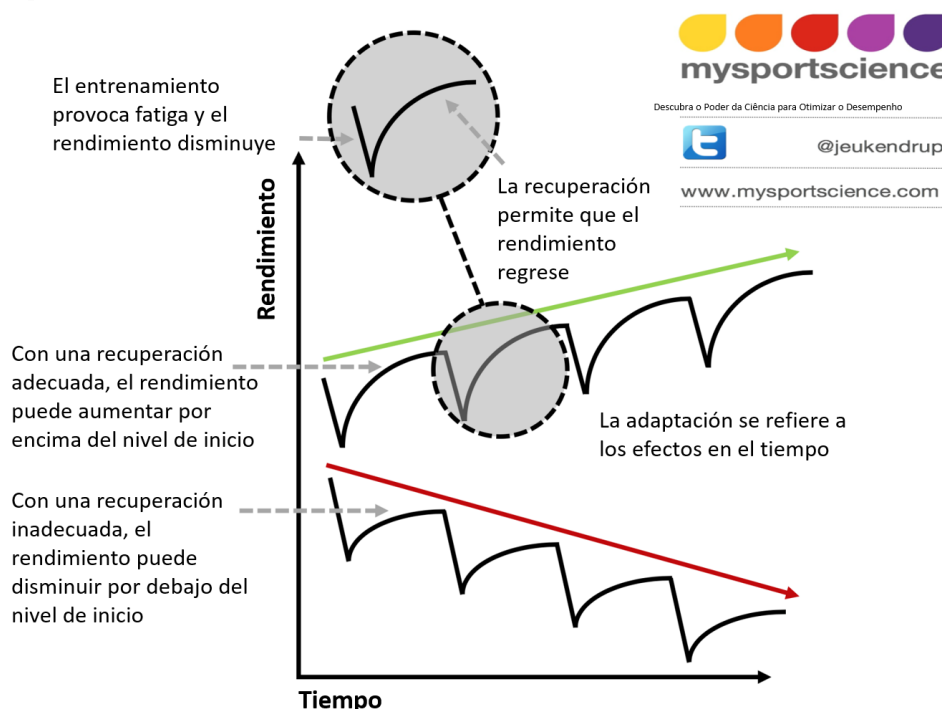
Por lo tanto, una definición rápida de recuperación es la siguiente: restauración completa de la capacidad de rendimiento hasta alcanzar la capacidad de rendimiento previa al ejercicio. Sin embargo, es importante distinguir entre la recuperación aguda o rápida y la recuperación o adaptación a largo plazo. "La adaptación a largo plazo se refiere a las mejoras en el sistema muscular y cardiovascular que finalmente darán como resultado mejoras en el rendimiento". (Jeukendrup, 2015, <https://bit.ly/2TjKY9m>). El término 'recuperación' se usa a menudo para estos procesos a corto y largo plazo. En las conversaciones, las recuperaciones a corto y largo plazo a menudo se confunden y "se denominan *recuperación*". Las dos están vinculadas, por supuesto, ¡pero no son lo mismo!". (Jeukendrup, 2015, <https://bit.ly/2TjKY9m>).

Recuperación: restauración completa de la capacidad de rendimiento hasta alcanzar la capacidad de rendimiento previa al ejercicio.

Adaptación: las mejoras en el sistema muscular y cardiovascular, así como otros sistemas, que con el tiempo tendrán como resultado mejoras en el rendimiento.

En la Figura 1 se pueden ver una recuperación aguda y una adaptación al entrenamiento a más largo plazo. La recuperación se refiere a los efectos agudos después de una serie de ejercicios, y la adaptación se refiere a los efectos a más largo plazo de series repetidas de ejercicio y recuperación. Con las intervenciones nutricionales podemos orientarnos específicamente a la recuperación a corto plazo, o podemos mejorar los efectos a largo plazo que tendrán como resultado adaptaciones mejoradas. Estas intervenciones nutricionales serán discutidas en las siguientes secciones.

Figura 1: Visualización de la recuperación y la adaptación



Fuente: Asker J., 2018. Recuperado de: <http://www.mysportscience.com/>

La recuperación se refiere al proceso agudo después de una sola serie de entrenamiento con ejercicios. La adaptación es el cambio que se produce con el tiempo. Cuando el tiempo de recuperación es insuficiente, la adaptación puede verse afectada negativamente. Sin embargo, a veces la optimización de la recuperación también puede deteriorar la adaptación a largo plazo.

Especialmente en los últimos años, ha quedado claro que lo que puede ser bueno para la recuperación aguda puede no ser necesariamente bueno para la adaptación a largo plazo. Aquí presentamos algunos ejemplos:

- Algunos estudios han sugerido que los antioxidantes pueden reducir el dolor muscular y ayudar con la recuperación a corto plazo, pero las dosis altas también se han relacionado con la reducción de los beneficios del entrenamiento a largo plazo. (Las dosis altas de antioxidantes pueden interferir con la señalización que se necesita para estimular la adaptación al entrenamiento).
- Reducir la inflamación con fármacos antiinflamatorios no esteroideos (AINE) como el ibuprofeno puede ayudar con la recuperación a corto plazo, así como con la reducción del dolor. Sin embargo, puede obstaculizar la adaptación a largo plazo.
- Los baños de hielo pueden al menos ayudar a la percepción de la recuperación a corto plazo, pero pueden reducir la adaptación al entrenamiento a largo plazo.

Hay muchos más ejemplos y, en general, la eliminación de las señales de estrés (que pueden ayudar con la recuperación a corto plazo) también reducirá las señales necesarias para la adaptación. Por lo tanto, al desarrollar una estrategia de recuperación, siempre es importante tener en mente la meta principal: ¿se trata de poder volver a desempeñarse varias horas después, o las metas principales están más lejos? En competiciones con varias rondas y solo unas pocas horas o días entre rondas, se deseará optimizar todas las estrategias de recuperación a corto plazo. Al prepararse para competir al comienzo de una temporada, la recuperación aguda no siempre es la prioridad más alta y puede ser mejor elegir una estrategia que mejore la adaptación al entrenamiento. (Jeukendrup, 2015, <https://bit.ly/2TjKY9m>).

Lo que parece un término simple (recuperación) es en realidad algo un poco más complejo. No solo enumeramos una serie de alimentos y métodos de recuperación que se utilizan en todas las condiciones. En su lugar, es importante enunciar las metas y desarrollar estrategias en consecuencia. (Jeukendrup, 2015, <https://bit.ly/2TjKY9m>).

Esto es parte del abordaje de nutrición periodizada discutido en el módulo **Nutrición periodizada**.

2.1.2 Adaptación al entrenamiento

El ejercicio, independientemente del tipo, tiene como resultado una adaptación que, si se repite con la frecuencia suficiente, mejora la función fisiológica y el rendimiento. El entrenamiento con ejercicios hace uso de este principio al planificar y aplicar sistemáticamente las actividades de ejercicios con el objetivo de optimizar esa adaptación. El objetivo final es, por supuesto, mejorar el rendimiento. La adaptación se produce en todos los niveles y en diferentes órganos del cuerpo. Esta adaptación incluye, entre otros aspectos, el aumento de la capilarización, la conversión del tipo de fibra muscular rápida a lenta, el aumento del tamaño del corazón, el aumento de la masa mitocondrial o el aumento de la masa muscular. Hace muchos años, el resultado de los programas de entrenamiento solo podía medirse al medir el rendimiento (para lo cual solo se necesitaba un cronómetro). A medida que mejoró la tecnología, se utilizaron mediciones fisiológicas sustitutas, como la frecuencia cardíaca, el VO_2 máx., etc. Para comprender mejor estos cambios fisiológicos, se estudiaron los eventos celulares y, finalmente, las técnicas permitieron el estudio de los mecanismos moleculares subyacentes a las adaptaciones al entrenamiento. El proceso de adaptación se inicia en el nivel molecular. Esto desencadena eventos a nivel celular, que pueden causar cambios fisiológicos y finalmente cambios en el rendimiento (Jeukendrup & Gleeson, 2018) (véase la Figura 1). La siguiente discusión se basa en parte en nuestro reciente libro de texto sobre nutrición deportiva (Jeukendrup & Gleeson, 2018), pero aquellos que deseen más detalles pueden consultar una serie de excelentes revisiones recientes: Coffey and Hawley (2007); Hawley, Lundby, Cotter, and Burke (2018); Holloszy and Booth (1976); Holloszy and Coyle (1984); Hughes, Ellefsen, and Baar (2018); Perry & Hawley (2018). Los efectos de la nutrición en la adaptación también se discuten en otras revisiones, tales como Craig et al. (2015) and Hawley (2013).

Las adaptaciones al ejercicio o al entrenamiento con ejercicios son específicas del ejercicio desempeñado. El ejercicio de alta intensidad (predominantemente anaeróbico) tendrá como resultado adaptaciones diferentes a las resultantes del ejercicio de intensidad moderada y de mayor duración (aeróbico). El ejercicio de carga generalmente tiene como resultado un fenotipo diferente al del entrenamiento de resistencia. Con el ejercicio de carga, la hipertrofia es una de las principales adaptaciones, mientras que el entrenamiento de resistencia no aumenta la masa muscular e incluso puede

disminuirla. Por otro lado, el entrenamiento de resistencia tiene como resultado una mayor capacidad oxidativa, aumentando la resistencia del músculo a la fatiga. La Tabla 1 enumera una serie de adaptaciones al ejercicio (ya sea ejercicio de carga o ejercicio de resistencia). (Jeukendrup y Gleeson, 2018).

Tabla 1: Adaptación típica después del entrenamiento de resistencia y después del entrenamiento de fuerza

	Entrenamiento de resistencia	Entrenamiento de fuerza
Densidad capilar	++	
Glucógeno muscular	++	++
Cantidad de mitocondrias	++	+
Densidad mitocondrial	++	+
ATP en reposo	–	+
PCr en reposo	–	+
Enzimas glucolíticas	–	+
Fosfofructoquinasa	–	+
Enzimas oxidativas	++	-/+
Succinatodeshidrogenasa	++	+
Citratosintasa	++	+
HAD	++	+
Gasto cardíaco máximo	++	+
Captación máxima de oxígeno (VO ₂ máx.)	++	+
Frecuencia cardíaca máxima	–	–
Volumen plasmático	++	
Tamaño de la fibra muscular	–	++
Oxidación de la grasa	++	+

Fuente: (Jeukendrup y Gleeson, 2018).

El ++ significa que la mayoría de los estudios han demostrado este efecto, + significa que algunos estudios han demostrado este efecto, -/+ significa que los resultados son mixtos. La ausencia de signo significa que el efecto no existe o es desconocido.



Entrenamiento de fuerza

El entrenamiento de fuerza o el entrenamiento de carga dan como resultado una variedad de adaptaciones en el músculo, incluida la hipertrofia (un aumento en el área de la sección transversal del músculo) y patrones de reclutamiento neural alterados. (Jeukendrup y Gleeson, 2018).

"La hipertrofia muscular puede ocurrir a través de dos procesos: un aumento en el número de núcleos dentro de cada fibra muscular o un aumento en la cantidad de material contráctil soportado por cada núcleo". (Jeukendrup y Gleeson, 2018). El ejercicio de carga es un potente estimulador de la síntesis de proteínas musculares. De hecho, el aumento agudo en la síntesis de proteínas musculares después del ejercicio es mucho mayor y, especialmente, de una duración mucho más prolongada que los cambios observados después de la alimentación.

Entrenamiento de resistencia

El entrenamiento con ejercicios de resistencia se caracteriza por el desarrollo de una mayor resistencia a la fatiga, en parte debido a la mayor densidad mitocondrial y, por lo tanto, a la proteína mitocondrial. Además, se producen alteraciones en los patrones de reclutamiento neural, la utilización del sustrato y el equilibrio ácido-base. Los reservorios glucogénicos intramusculares y las reservas de triacilglicerol aumentan después del entrenamiento de resistencia, aunque las cantidades de estas reservas de combustible dependen del tiempo transcurrido desde la última sesión de ejercicio y de la adecuación de la nutrición en el período posterior al ejercicio. La dependencia de los carbohidratos (glucógeno) como combustible disminuye, y la capacidad de oxidar la grasa aumenta. Estos cambios dan como resultado el ahorro de glucógeno muscular durante el ejercicio. El entrenamiento de resistencia no altera en gran medida el tamaño de la fibra muscular, aunque en algunos estudios se ha observado un aumento en el área de la sección transversal de las fibras tipo I de alrededor del 20%. El entrenamiento de resistencia puede aumentar el contenido de proteína mitocondrial del músculo en un 50 a un 100% en 6 semanas (Hoppeler & Fluck, 2003; Hoppeler et al., 1985). (Este aumento en el tamaño y el número de mitocondrias se suele denominar biogénesis mitocondrial). La densidad mitocondrial y la actividad enzimática mitocondrial son muy buenos predictores del rendimiento de resistencia. Las

adaptaciones al entrenamiento son solo temporales. Por ejemplo, si no se mantiene un estímulo de entrenamiento de resistencia, las proteínas mitocondriales se descompondrán nuevamente. Su vida media es tan solo de aproximadamente 1 semana. (Jeukendrup y Gleeson, 2018).

Las adaptaciones solo ocurrirán si la tasa de síntesis de proteínas supera la tasa de descomposición de proteínas durante un período de tiempo. El tipo de proteínas sintetizadas depende del tipo y la intensidad del entrenamiento realizado. "En general, el entrenamiento de carga aumenta la masa muscular, pero no aumenta marcadamente la capacidad oxidativa del músculo, aunque algunos estudios han observado mejoras en la actividad enzimática oxidativa" (Jeukendrup y Gleeson, 2018). (citratosintasa; véase la Tabla 1).

Se ha demostrado repetidamente que el ejercicio aumenta la síntesis proteica neta después del ejercicio tanto de resistencia como de carga. Un requisito es que las ingestas de proteínas y energía en la dieta sean adecuadas. El entrenamiento sin ingesta de proteínas o el entrenamiento con un balance energético negativo tienen poco o ningún efecto sobre las tasas de síntesis de proteínas (Jeukendrup y Gleeson, 2018).

Al estudiar e interpretar la literatura científica sobre este tema, es importante darse cuenta de que la mayoría de los estudios han analizado la síntesis de proteínas musculares mixtas sin analizar específicamente qué proteínas se sintetizan. Es probable que con el ejercicio de carga haya una síntesis predominantemente de actina y miosina, mientras que el ejercicio de resistencia genera principalmente una biogénesis mitocondrial con poco o ningún cambio en la síntesis de proteínas miofibrilares. (Wilkinson et al. 2008, <https://bit.ly/2PMR7fS>).

El aumento en la síntesis de proteínas después del ejercicio de resistencia o de carga puede durar hasta unos 2 a 4 días después de la última sesión de entrenamiento (Jeukendrup y Gleeson, 2018).

Los desencadenantes

El complejo proceso de adaptación inducida por el ejercicio en el músculo esquelético comienza con una combinación de distintas clases de estrés que desencadenan eventos moleculares específicos. Estos estreses son diferentes para el entrenamiento de fuerza y

el de resistencia: con el entrenamiento de fuerza, la mayoría de los estreses son mecánicos; mientras que durante el ejercicio de resistencia, los estreses son principalmente metabólicos. En todas las situaciones, la homeostasis celular se ve perturbada y esto inicia una cascada de eventos que finalmente dan como resultado una adaptación. Esta adaptación garantizará que haya menos perturbación de la homeostasis la próxima vez que se realice el mismo ejercicio.

En general, existen 4 categorías de estrés:

1. carga mecánica
2. activación neuronal
3. ajustes hormonales y
4. perturbaciones metabólicas.

Una combinación de estos estreses desencadena eventos moleculares específicos que a su vez inician un aumento en la síntesis de proteínas. Ciertos mecanismos de señalización son activados por el estrés derivado del ejercicio, y estos mecanismos inician la replicación de secuencias genéticas (genes) del ácido desoxirribonucleico (ADN) que permiten la posterior traducción del código genético en una serie de aminoácidos para sintetizar nuevas proteínas. La acumulación de estas proteínas específicas finalmente da como resultado adaptaciones al entrenamiento. Existen diferentes mecanismos de señalización para diferentes tipos de entrenamiento. Estos eventos de señalización y los aumentos resultantes en el ácido ribonucleico mensajero (ARNm), así como la síntesis de proteínas específicas, dependen del tipo, la intensidad y la duración del ejercicio realizado, pero también de la ingesta de ciertos nutrientes. A continuación, exploraremos primero los eventos de señalización molecular que subyacen a las adaptaciones al entrenamiento y los efectos que los diferentes modos de ejercicio y nutrición pueden tener en estos eventos, así como en el resultado. (Jeukendrup y Gleeson, 2018).

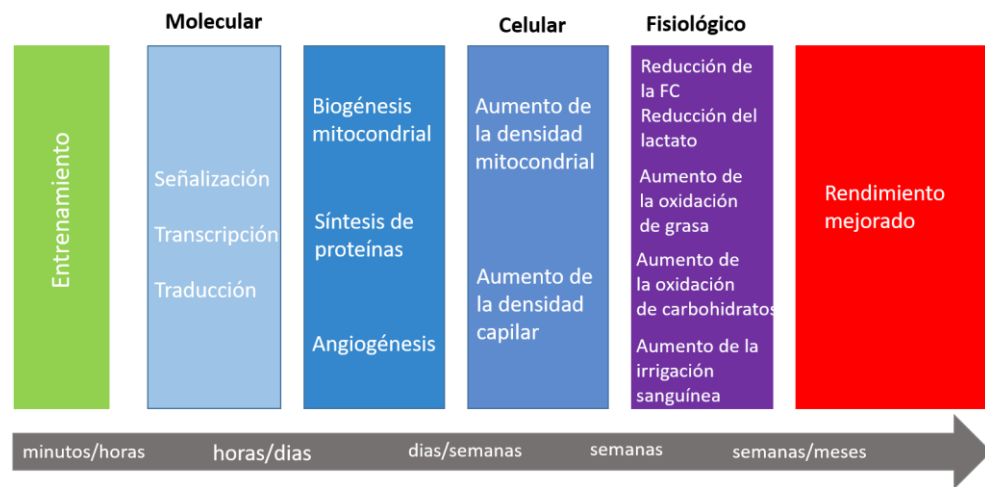
En la sección anterior, utilizamos el término síntesis proteica neta, lo que significa que la síntesis de proteínas excede la descomposición de proteínas. Sin embargo, la descomposición de las proteínas también

puede ser importante: las proteínas antiguas y dañadas deben eliminarse para que puedan desarrollarse nuevas proteínas. Por lo tanto, lo que es realmente importante es la renovación proteica. La renovación proteica se refiere a aumentar la tasa de la síntesis y la descomposición de proteínas dentro del músculo. Aumentar la renovación proteica es esencial para reparar las fibras musculares dañadas durante el ejercicio (entrenamiento o competición).

"Las proteínas se descomponen para reemplazar las fibras dañadas y proporcionar un estímulo para la reparación muscular. Como resultado, la descomposición de proteínas es proporcional a la síntesis de proteínas" (Phillips, Tipton, Aarsland, Wolf, & Wolfe, 1997, <https://bit.ly/2DF7eoC>), "y los deportistas entrenados pueden reciclar los aminoácidos que se liberan a partir de la descomposición del músculo dañado" (Phillips et al., 1997, <https://bit.ly/2DF7eoC>), "lo que da como resultado músculos más grandes y más fuertes cuando la renovación es alta" (Baar y Heaton, 2015, <https://bit.ly/2QuMLq1>).

El entrenamiento puede tener efectos profundos en la renovación proteica y en la morfología y función muscular. Como se discutió anteriormente, diferentes tipos de entrenamiento tienen efectos distintos. Por ejemplo, el entrenamiento de fuerza da como resultado una hipertrofia muscular, un aumento de la masa muscular y un probable mantenimiento o un ligero aumento de la masa mitocondrial (Tang, Perco, Moore, Wilkinson, & Phillips, 2008). El entrenamiento con ejercicios, especialmente en los deportes de equipo, suele ser una combinación de fuerza y resistencia, y las mejoras en la fuerza o la resistencia dependen de la intensidad relativa y la fuerza necesaria para completar las sesiones de entrenamiento. Cualquiera que sea la adaptación, la renovación proteica y la síntesis proteica neta son requeridas y deben ocurrir en la fase de recuperación entre las sesiones de entrenamiento (Jeukendrup y Gleeson, 2018).

Figura 2: Una serie de eventos moleculares y celulares preceden a las adaptaciones fisiológicas y los cambios que apuntalan el rendimiento.



Fuente: Jeukendrup y Gleeson, 2018.

Sólo un estímulo de entrenamiento repetido durante períodos prolongados dará como resultado los cambios fisiológicos requeridos.

2.1.3 El comienzo de la adaptación

"La síntesis de proteínas está regulada por vías de transducción de señales. Las señales locales y sistémicas se detectan y computan, y regulan diversas funciones celulares" (Jeukendrup y Gleeson, 2018).

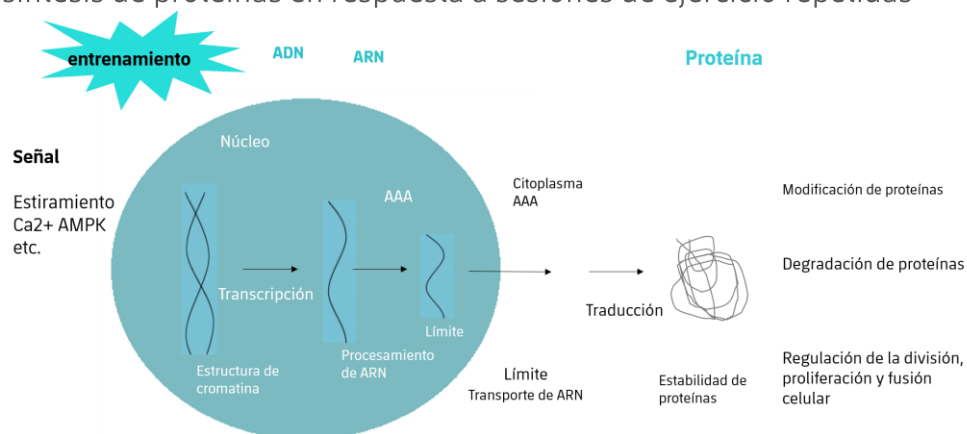
Usemos una fábrica como analogía. Las señales son los pedidos que llegan a una fábrica. Hay una demanda de ciertos productos que necesitan ser fabricados. Los pedidos pueden llegar por correo electrónico, teléfono o fax (diferentes señales). Un empleado se ocupará de estas señales y las transmitirá a la persona a cargo de la fabricación. Este mensaje entre el receptor de los pedidos y la persona encargada de la fabricación es un ejemplo de un "mecanismo de señalización". En el músculo, "los principales mecanismos de señalización son la fosforilación de los residuos de serina, treonina y tirosina por las quinasas y su desfosforilación por las fosfatasas". (Jeukendrup y Gleeson, 2018, <https://bit.ly/2Q1cbP1>).

Estos procesos de fosforilación se inician mediante señales como la disponibilidad de nutrientes, el pH, la presión parcial de oxígeno, las especies reactivas de oxígeno (ERO) y los estímulos mecánicos (los pedidos que llegaron). Los sistemas endocrino y nervioso proporcionan más aportes. En las células, esta mezcla de señales en constante cambio se detecta a través de proteínas sensoras específicas. Ejemplos de proteínas sensoras son los receptores de membrana celular y las

proteínas de aminoácidos, calcio o sensoras de AMP. La activación de una proteína sensora desencadenará posteriormente una cascada de reacciones. Estas cascadas de reacciones forman el enlace entre las señales y el cambio en la función celular. Entonces, en la analogía con la fábrica: los pedidos vienen en diferentes formas y son procesados por trabajadores que luego pasan la información al equipo que se ocupa de la fabricación.

Las proteínas quinasas son típicamente parte de una cascada de reacciones que generalmente siguen la secuencia de eventos representada en la Figura X. Este modelo se simplifica excesivamente porque muchas señales convergen o se ramifican. Estas vías de transducción de señales pueden influir en una serie de eventos celulares y, en última instancia, darán lugar a una función alterada. La descripción general anterior de las vías de señalización probablemente se aplique a la mayoría de las células en la mayoría de las situaciones. Los detalles de estas cascadas de señalización, los desencadenantes, las proteínas y las quinasas involucrados son diferentes en diferentes tejidos y diferentes situaciones. Para comprender las adaptaciones en las células musculares en respuesta al entrenamiento con ejercicios, las vías de señalización en los músculos deben estudiarse de manera más detallada. (Jeukendrup y Gleeson, 2018).

Figura 3: Adaptaciones al entrenamiento como resultado de una mayor síntesis de proteínas en respuesta a sesiones de ejercicio repetidas



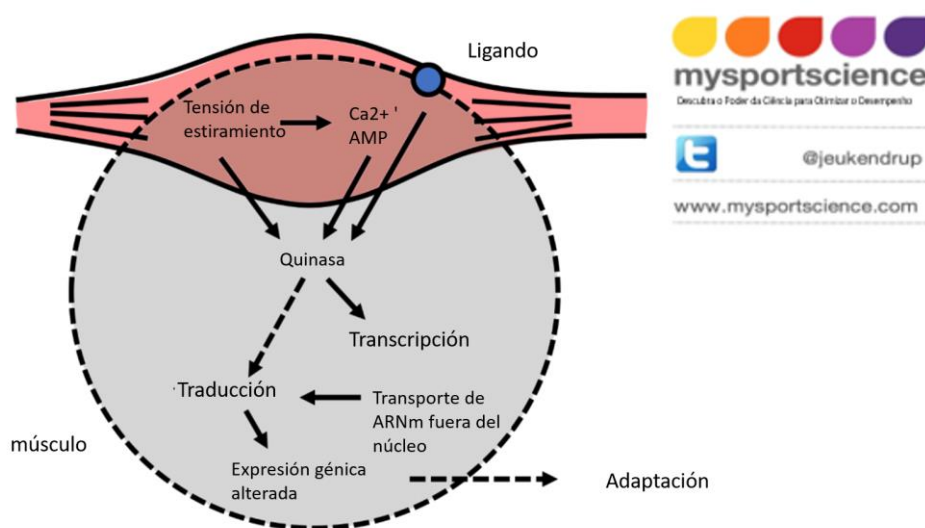
Fuente: Jeukendrup y Gleeson, 2018.

Se cree que una sesión de ejercicio provoca una señal para transcribir el ADN en el núcleo en ARN, que luego se transporta fuera del núcleo y se traduce en proteínas. La señal causada por el estímulo del ejercicio determina qué proteínas se sintetizan. La cantidad de proteína formada está determinada no solo por la señal, la transcripción y la traducción, sino también por el procesamiento del ARN y la estabilidad de las proteínas.

"El ejercicio da como resultado un estiramiento o tensión muscular, cambios en las concentraciones intracelulares de ion calcio (Ca^{2+}), cambios en la carga de energía de la célula y cambios en el potencial de oxidorreducción". (Jeukendrup y Gleeson, 2018) (Figura 3).

Ciertas hormonas y otros ligandos que pueden unirse a los receptores en la superficie celular pueden alterar estas señales. Estos mensajeros primarios pueden luego desencadenar una serie de eventos moleculares secundarios que aumentan o disminuyen la transcripción o la traducción, según se describe en las Figuras 3 y 4. El proceso de síntesis de proteínas ha comenzado. La siguiente sección analiza las señales primarias de manera más detallada.

Figura 4: Modelo simplificado de transducción de señales en relación con el ejercicio



Fuente: Jeukendrup y Gleeson, 2018.

La contracción muscular puede dar como resultado una perturbación de la homeostasis. El estrés mecánico (estiramiento, tensión), Ca^{2+} y la acumulación de AMP o metabolitos son señales primarias que afectan el estado de fosforilación de diversas quinanas. Estas quinanas pueden influir en el proceso de transcripción, el transporte de ARNm fuera de la célula y la traducción. Las hormonas y otros ligandos pueden influir en

estas señales. Los cambios en la expresión génica pueden dar como resultado diferentes adaptaciones.

Las vías de transducción de señales controlan los siguientes procesos:

- 1- Transcripción de genes (secuencias específicas de ADN) en el ARNm
2. Traducción de ARNm en proteína
3. Modificación de la proteína que altera la actividad catalítica
4. Regulación de la degradación de proteínas
5. Regulación de la división, proliferación y fusión celular

(Jeukendrup y Gleeson, 2018).

2.1.4 Las señales en más detalle

"La base para cualquier adaptación al entrenamiento es una perturbación de la homeostasis. Los cambios metabólicos o mecánicos en el músculo inician una cascada de señalización que hace que las proteínas relevantes se descompongan y se sinteticen". (Jeukendrup y Gleeson, 2018).

Estiramiento y tensión musculares

Los efectos mecánicos de la contracción muscular causan la activación de una serie de vías de señalización (Figura 4). "Específicamente, el estiramiento muscular o la tensión alterada pueden inducir la activación de las cascadas de señalización de la calcineurina, la proteína quinasa activada por mitógenos (MAPK) y el factor de crecimiento insulinoide (FCI)". (Jeukendrup y Gleeson, 2018).

Ca²⁺

La activación neural del músculo esquelético genera un potencial de acción que tiene como resultado la liberación de Ca²⁺ de los túbulos T del retículo sarcoplasmático. Cuando se detiene el ejercicio, el Ca²⁺ vuelve del citoplasma al retículo sarcoplasmático. Las fluctuaciones en la concentración de Ca²⁺ o la liberación y recaptación de Ca²⁺ en el retículo sarcoplasmático son diferentes para diferentes tipos de actividades, lo que podría explicar, al menos en parte, las diferencias en la respuesta adaptativa

al ejercicio. El ejercicio de resistencia, por ejemplo, da como resultado concentraciones más prolongadas y moderadamente elevadas, mientras que el ejercicio de alta intensidad causa períodos más cortos de concentraciones muy altas de Ca^{2+} . Las elevaciones de la concentración de Ca^{2+} en el citoplasma muscular activan la calmodulina quinasa (CaMK) y la calcineurina (CaN) (Jeukendrup & Gleeson, 2018).

Cambios en el estado de la energía celular

Durante la contracción muscular, el ATP se descompone para proporcionar energía. En este proceso se forman el ADP y el Pi. El ADP se vuelve a sintetizar en ATP mediante glucólisis o fosforilación oxidativa. Una porción de ADP se descompone en AMP. La proporción de metabolitos ADP, AMP y Pi en relación con la de ATP a menudo se denomina carga de energía. Si existe una gran cantidad de ATP y pocos metabolitos, la carga de energía es alta. Si la concentración de metabolitos aumenta, la carga de energía es baja. Estos metabolitos son importantes reguladores del metabolismo, pero también sirven como moléculas de señalización. El AMP en particular puede activar la proteína quinasa activada por 5'adenosín (AMPK), un potente mensajero secundario. La AMPK parece desempeñar un rol en la regulación de una variedad de procesos que incluyen la captación de glucosa, la oxidación de ácidos grasos, la hipertrofia y la expresión génica. El potencial de oxidorreducción es otro indicador del estado de energía de la célula. Si la proporción de la forma oxidada de la coenzima nicotinamida adenina dinucleótido (NAD^+) a su forma reducida (NADH) es alta, se indica un estado de energía deficiente. (Jeukendrup y Gleeson, 2018).

Radicales libres

El mantenimiento del potencial de oxidorreducción también produce moléculas de oxígeno de radicales libres volátiles (especies reactivas de oxígeno o ERO). También se piensa que estas ERO desempeñan un rol en la señalización inducida por el ejercicio, que en última instancia será responsable de las adaptaciones al entrenamiento. Esta señalización puede funcionar mediante la actuación de ERO sobre factores de transcripción como el factor nuclear kappa B (NFkB) y la

proteína activadora 1 (AP1). Aunque los radicales libres se discuten a menudo en relación con el envejecimiento y las enfermedades, puede ser que también sean importantes para permitir adaptaciones al entrenamiento. (Jeukendrup y Gleeson, 2018).

Hormonas

Las hormonas también pueden afectar la activación de las quinasas. Una hormona u otro ligando se une a un receptor, que luego cambia el estado de fosforilación de una quinasa (Figura 4). Por ejemplo, cuando la hormona tiroidea (triiodotironina o T3) se une a su receptor, el proceso induce la fosforilación de AMPK en el músculo esquelético.

Los mensajeros primarios activan una serie de mensajeros secundarios. Estos mensajeros secundarios son a menudo quinasas y fosfatasas, que se activan para transmitir la señal inducida por el ejercicio. Los mensajeros secundarios a menudo involucran una serie compleja de reacciones (cascadas), que están altamente reguladas. A continuación, discutiremos algunos de los mensajeros más estudiados.